



Universidade Federal  
do Rio de Janeiro  

---

Escola Politécnica

AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DE TUBOS COMPÓSITOS  
FABRICADOS POR ENROLAMENTO FILAMENTAR SUBMETIDOS À PRESSÃO  
INTERNA.

Victor Parreira Gonçalves

Projeto de graduação apresentado ao Curso de  
Engenharia de Materiais da Escola Politécnica,  
Universidade Federal do Rio de Janeiro, como  
parte dos requisitos necessários à obtenção do  
título de Engenheiro.

Orientadores: Fernando Luiz Bastian

Luiz Antônio Lourenço Martins

Rio de Janeiro  
Setembro de 2012

AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DE TUBOS COMPÓSITOS  
FABRICADOS POR ENROLAMENTO FILAMENTAR SUBMETIDOS À PRESSÃO  
INTERNA.

Victor Parreira Gonçalves

PROJETO DE GRADUAÇÃO SUBMETIDO AO CORPO DOCENTE DO CURSO DE  
ENGENHARIA METALÚRGICA E DE MATERIAIS DA ESCOLA POLITÉCNICA DA  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS  
NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE ENGENHEIRA DE MATERIAIS.

Examinado por:

---

Prof. Fernando Luiz Bastian, Ph.D. - Orientador  
DMM / Escola Politécnica / UFRJ

---

Luiz Antônio Lourenço Martins, D.Sc. - Orientador  
PEMM / COPPE / UFRJ

---

Prof. Enrique Mariano Castodreza, D.Sc.  
DMM / Escola Politécnica / UFRJ

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL

Setembro de 2012

GONÇALVES, VICTOR PARREIRA

AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DE TUBOS COMPÓSITOS FABRICADOS POR ENROLAMENTO FILAMENTAR SUBMETIDOS À PRESSÃO INTERNA / Victor Parreira Gonçalves – Rio de Janeiro: UFRJ / Escola Politécnica, 2012.

IX, 64 p.: il.; 29,7 cm.

Orientadores: Fernando Luiz Bastian e Luiz Antônio Lourenço Martins

Projeto de Graduação – UFRJ / POLI / Curso de Engenharia de Materiais, 2012.

Referências Bibliográficas: p. 62 - 64.

1. Materiais Compósitos; 2. Enrolamento Filamentar; 3. Ensaio Hidrostáticos.

I. Fernando Luiz Bastian; II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, UFRJ, Engenharia Metalúrgica; III. AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DE TUBOS COMPÓSITOS FABRICADOS POR ENROLAMENTO FILAMENTAR SUBMETIDOS À PRESSÃO INTERNA.

*“Nas grandes batalhas da vida, o  
primeiro passo para a vitória é o  
desejo de vencer”*

**Mahatma Gandhi**

*Dedico este trabalho à  
minha família, amigos e todos que  
de certa forma contribuíram.*

# AGRADECIMENTOS

Dedico este trabalho,

À Deus, por me proporcionar forças, saúde e proteção nessa jornada.

À meus pais, Jose Luis e Liana, por todo apoio, compreensão, carinho e incentivo em toda minha vida.

À minha madrinha Laline e minha prima Cláudia por sempre me apoiarem.

À minha namorada Priscilla por fazer o final deste trabalho mais alegre.

Ao professor Bastian pela oportunidade na Iniciação científica e orientação.

Ao Amigo Luiz Antônio pela orientação e soluções simples e criativas nos eventuais problemas.

Ao professor Henrique por disponibilizar seu tempo na avaliação deste trabalho.

Aos técnicos do PEMM: Nelson, João, Robson, Oswaldo por toda assistência.

Aos técnicos da oficina da engenharia mecânica pela força, conversas e por fazer o trabalho mais divertido.

Ao técnico da oficina mecânica da física, Flávio, por toda prontidão em ajudar na confecção de peças de última hora.

Aos amigos de graduação, em especial: Victor Mangia, Rodrigo, Diogo, Pedro Porto, Evandro, Jéssica, Vanessa, Priscila, Bruno Raphael, Bruno Pacheco, Thiago Moraes.

Aos amigos de longa data: Eduardo Leonardo, Nelson, Diego e Ronald.

Aos amigos do laboratório de compósitos: Carolina, Ledjane, Raphael Cidade, Daniel, Angélica, Letícia, Dênis, Miguel, Marcelo, Aldecir, Mônica, Wallace.

Aos amigos da GERDAU por todos os ensinamentos em minha vida profissional.

À todos que de certa forma contribuíram, muito obrigado!

Resumo do Projeto de Graduação apresentado à Escola Politécnica / UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Engenharia de Materiais.

## AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DE TUBOS COMPÓSITOS FABRICADOS POR ENROLAMENTO FILAMENTAR SUBMETIDOS À PRESSÃO INTERNA

Victor Parreira Gonçalves

Setembro/2012

Orientadores: Fernando Luiz Bastian

Luiz Antônio Lourenço Martins

Curso: Engenharia de Materiais

O grande avanço tecnológico observado nas últimas décadas tem exigido materiais cada vez mais sofisticados por diversos tipos de indústrias. Materiais convencionais de uso em engenharia não têm sido capazes de atender toda essa demanda. Nesse cenário, a utilização de materiais compósitos tem sido cada vez maior. Apresentando elevadas propriedades mecânicas, baixo peso e boa resistência à corrosão, esses materiais tem sido largamente utilizados na área de exploração *offshore* de petróleo. Principalmente na produção de *rises* rígidos, que são tubulações que transportam petróleo do poço até a plataforma. O presente estudo visa à produção de tubos compósitos pela técnica de enrolamento filamental e caracterização das propriedades mecânicas dos mesmos, através de ensaios hidrostáticos de pressão interna e ensaios de tração em anéis. Também serão apresentadas as análises microestruturais e dimensionais, assim como a densidade e fração volumétrica de fibras desses tubos.

**Palavras chave:** *Materiais Compósitos, enrolamento filamental, ensaios hidrostáticos, Pressão interna.*

Abstract of Undergraduate Project presented to POLI/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for degree of Engineer of Materials.

EVALUATION OF MECHANICAL BEHAVIOR OF COMPOSITE TUBES  
MANUFACTURED BY FILAMENT WINDING SUBMITTED TO INTERNAL  
PRESSURE

Victor Parreira Gonçalves

Setembro/2012

Advisors: Fernando Luiz Bastian

Luiz Antônio Lourenço Martins

Course: Materials Engineering

The great technological advance over the past decades has required increasingly sophisticated materials for various types of industries. Materials used in conventional engineering have not been able to meet all this demand. In this scenario, the use of composite materials has been increasing. Featuring high mechanical properties, low weight and good corrosion resistance, these materials have been widely used in the area of offshore oil. Mainly in the production of rigid risers, which are pipes that carry oil from the well to the platform. The present study aims at the production of composite tubes by filament winding technique and characterization of their mechanical properties of the same, through hydrostatic testing with internal pressure and tensile tests on rings. Microstructural and dimensional analysis, as well as the density and fiber volume fraction of these tubes were evaluated.

**Keywords:** *composites materials, filament winding, hydrostatics tests, internal pressure.*



# Sumário

|   |      |
|---|------|
| Lista de Figuras .....                                | xi   |
| Lista de Tabelas .....                                | xiii |
| 1) Introdução.....                                    | 14   |
| 2) Revisão Bibliográfica .....                        | 16   |
| 2.1) Materiais compósitos .....                       | 16   |
| 2.2) Matriz Polimérica .....                          | 17   |
| 2.2.1) Resinas epóxi .....                            | 19   |
| 2.3) Reforço.....                                     | 20   |
| 2.3.1) Fibra de vidro.....                            | 22   |
| 2.4) Enrolamento filamentar.....                      | 23   |
| 2.5) Ensaio hidrostático de pressão interna .....     | 25   |
| 2.6) Ensaio de tração em anel .....                   | 28   |
| 3) Materiais e Métodos .....                          | 31   |
| 3.1) Materiais.....                                   | 31   |
| 3.1.1) Matriz polimérica .....                        | 31   |
| 3.1.2) Reforço.....                                   | 32   |
| 3.2) Métodos.....                                     | 32   |
| 3.2.1) Fabricação dos tubos .....                     | 32   |
| 3.2.2) Densidade e fração volumétrica de fibras ..... | 36   |
| 3.2.3) Medições de diâmetro interno e espessura ..... | 38   |
| 3.2.4) Análise Microestrutural .....                  | 39   |
| 3.2.5) Ensaios Hidrostáticos de Pressão Interna ..... | 40   |
| 3.2.5.1) Ensaios hidrostáticos sem liner .....        | 42   |
| 3.2.5.2) Ensaios hidrostáticos com liner .....        | 42   |
| 3.2.6) Ensaios de tração em anel .....                | 43   |
| 4) Resultados e discussões .....                      | 46   |
| 4.1) Densidade e fração volumétrica de fibras .....   | 46   |

|        |   |    |
|--------|---|----|
| 4.2)   | Medições de diâmetro e espessura .....      | 46 |
| 4.3)   | Análise Microestrutural .....               | 47 |
| 4.4)   | Ensaio hidrostático de pressão interna..... | 49 |
| 4.4.1) | Ensaio hidrostático sem Liner .....         | 49 |
| 4.4.2) | Ensaio hidrostático com liner .....         | 51 |
| 4.5)   | Ensaio de tração em anel .....              | 55 |
| 5)     | Conclusões.....                             | 59 |
| 6)     | Sugestões para trabalhos futuros .....      | 61 |
| 7)     | Referências Bibliográficas .....            | 62 |

## Lista de Figuras

|   |    |
|---|----|
| Figura 1 - Dutos para aplicações (a) Marítimas, (b) terrestres .....  | 15 |
| Figura 2 - Classificação dos materiais compósitos .....   | 16 |
| Figura 3 - Esquema representativo de (a) um polímero termoplástico e (b) um polímero termofixo .....  | 18 |
| Figura 4 - Grupo epoxídico .....  | 19 |
| Figura 5 - Estrutura química do diglicidil éter do bisfeno-A (DGEBA).....   | 19 |
| Figura 6 – Perfis tensão x posição quando ao comportamento da fibra é, (a) menor que o crítico; (b) igual ao crítico e (c) quando é maior que o crítico. .... | 21 |
| Figura 7 - Esquema do método de enrolamento filamental .....  | 23 |
| Figura 8 - Representação das formas de enrolamento filamental .....   | 24 |
| Figura 9 - Esquema da geometria do processo de enrolamento filamental .....   | 25 |
| Figura 10 - Representação das tensões atuantes em uma tubulação .....   | 26 |
| Figura 11 - Ilustração do aparato utilizado no teste hidrostático.....  | 27 |
| Figura 12 - Superfície de falha (a) funcional do tubo $[\pm 75^\circ]_4$ ; (b) estrutural do tubo $[\pm 55^\circ]_4$ .....                                    | 28 |
| Figura 13 - Esquema representativo do ensaio de tração em anel .....  | 29 |
| Figura 14 - Comparação entre a tensão de ruptura de diferentes tipos de fibra com a variação do ângulo de enrolamento .....                                   | 30 |
| Figura 15 - Roving de fibra de vidro. ....  | 32 |
| Figura 16 - Máquina de enrolamento filamental.....  | 33 |
| Figura 17 - (a) Mandril desmontado; (b) Mandril montado.....  | 33 |
| Figura 18 - (a) Superfície do mandril impregnada com desmoldante; (b) Superfície do mandril envolvida com a folha de teflon. ....                             | 34 |
| Figura 19 - Camada de tecido de poliéster envolvendo o mandril. ....  | 34 |
| Figura 20 - Início do processo de enrolamento filamental.....   | 35 |
| Figura 21 - Estufa usada para o processo de cura.....   | 35 |
| Figura 22 - Tubos compósitos ao fim do processo. ....   | 36 |
| Figura 23 - Amostras e picnômetro utilizado para medição de densidade.....  | 37 |
| Figura 24 - (a) Amostras antes da queima; (b) Amostras após queima.....   | 38 |
| Figura 25 - Amostras embutidas e preparadas para microscopia.....   | 39 |
| Figura 26 - (a) bomba hidropneumática; (b) Câmara de testes; (c) aparato de aquisição de dados.....   | 40 |
| Figura 27 - (a) Barra roscada com as cabeças de vedação; (b) Sistema de vedação. ....   | 41 |

|  |    |
|--|----|
| Figura 28 - Tubo com camadas helicoidais de $\pm 60^\circ$ preparado para o ensaio hidrostático. ....  | 42 |
| Figura 29 - (a) Liner de PVC; (b) Tubo com camadas helicoidais de $\pm 45^\circ$ preparado para o ensaio hidrostático; (c) esquema de proteção da câmara de testes. .... | 43 |
| Figura 30 - (a) Dimensões do corpo de prova ; (b) Corpo de prova usinado. ....   | 44 |
| Figura 31 - (a) Esquema do mecanismo de garras ; (b) Corpo de prova ao início do teste. ....   | 45 |
| Figura 32 - Micrografia dos tubos com camadas helicoidais de: a) $30^\circ$ ; b) $45^\circ$ ; c) $55^\circ$ ; d) $60^\circ$ . ....                                       | 48 |
| Figura 33 - Curvas Pressão x Tempo dos tubos ensaiados sem liner de PVC. ....  | 49 |
| Figura 34 - (a) Falha funcional no tubo 4; (b) Marca da falha funcional no tubo 2. ....  | 51 |
| Figura 35 - Curvas Pressão x Tempo dos tubos ensaiados com liner de PVC. ....  | 52 |
| Figura 36 - Falha estrutural no: (a) Tubo1, (b) Tubo2, (c) Tubo 3 e (d) Tubo4. ....  | 53 |
| Figura 37 - Curvas Tensão x Deslocamento dos corpos de prova do tubo 1. ....   | 55 |
| Figura 38 - Curvas Tensão x Deslocamento dos corpos de prova do tubo 2. ....   | 56 |
| Figura 39 - Curvas Tensão x Deslocamento dos corpos de prova do tubo 3. ....   | 56 |
| Figura 40 - Curvas Tensão x Deslocamento dos corpos de prova do tubo 4. ....   | 57 |
| Figura 41 - Corpos de prova de anel após o ensaio. ....  | 58 |

## Lista de Tabelas

|  |    |
|--|----|
| Tabela 1 - Aplicações de compósitos de matriz polimérica reforçados por fibras em diferentes áreas. .... | 17 |
| Tabela 2 – Composição química de alguns tipos de fibra de vidro em peso (%). ....                        | 22 |
| Tabela 3 - Propriedades da mistura. ....   | 31 |
| Tabela 4 - Nomeclatura dos tubos fabricados por enrolamento filamentar. ....                             | 36 |
| Tabela 5 - Densidade e fração volumétrica de fibra dos tubos. ....                                       | 46 |
| Tabela 6 - Resultados das medições dos tubos. ....   | 47 |
| Tabela 7 - Resultados experimentais da pressão de vazamentos dos tubos. ....                             | 50 |
| Tabela 8 - Resultados experimentais de pressão de explosão dos tubos. ....                               | 52 |
| Tabela 9 - Valores de tensão circunferencial dos tubos. ....   | 55 |
| Tabela 10 - Resultados experimentais de tensão e deslocamentos médios. ....                              | 57 |

## 1) Introdução

O crescente desenvolvimento tecnológico observado nas últimas décadas tem demandado cada vez mais a utilização de materiais mais sofisticados. Apenas os materiais tradicionais como metais, cerâmicos e polímeros não tem sido capazes de atender todas essas necessidades. É então nesse cenário que cresce a utilização de materiais compósitos.

Materiais compósitos apresentam vantagem em relação aos outros materiais pelo fato de poderem ser projetados de acordo com a aplicação. Além disso, apresentam baixa massa específica e boas propriedades mecânicas, como elevada rigidez, boa resistência à fadiga e impacto [1]. Esses materiais tem ganhado destaque em diversas áreas, como automotiva, médica, aeroespacial, esportiva, militar, entre outras.

Uma área com possível aplicação desses materiais é a de exploração *offshore* de petróleo. Devido à escassez de petróleo em águas mais rasas, em alguns países, a extração de petróleo em águas cada vez mais profundas, onde ocorrem pressões elevadas torna-se necessária. Um exemplo é o Brasil, com o início da exploração de petróleo na camada pré-sal. Uma possível aplicação nessa área seria na fabricação de *risers* rígidos, que são tubulações que conduzem o petróleo do poço até a plataforma.

Os *risers* rígidos atuais são feitos de aço, apresentando elevado peso, requerendo mecanismos de tração e flutuação caros. Além do mais, o projeto desses equipamentos é regido por fadiga. *Risers* fabricados de compósitos são mais leves, apresentam maior resistência à corrosão e fadiga, possuem bom isolamento térmico e podem ser projetados para se obter um sistema estruturalmente e mecanicamente melhor [2]. Além dessa aplicação, tubos compósitos podem ser utilizados em vasos de pressão, dutos terrestres, tanques de armazenamento e dutos para distribuição de água em torres de resfriamento que requerem boa resistência à corrosão e baixas pressões [3]. A Figura 1 mostra alguma dessas aplicações.



(a)



(b)

Figura 1 - Dutos para aplicações (a) Marítimas, (b) terrestres [3].

Assim sendo, o presente trabalho visa a produção de tubos compósitos com quatro camadas de fibra, pela técnica de enrolamento filamentar, projetados com diferentes orientações das fibras das camadas helicoidais. Esses tubos foram testados quanto à resistência mecânica à pressão interna, através de ensaios hidrostáticos e tração em anéis que simula as tensões circunferenciais, segundo a norma ASTM D 2290. Também foi feita a análise microestrutural do material, e a determinação da densidade, fração volumétrica de fibras e dimensional dos tubos.

## 2) Revisão Bibliográfica

### 2.1) Materiais compósitos

Materiais compósitos podem ser definidos como a combinação de dois ou mais materiais distintos, tendo uma discreta e identificável interface separando-os. Compósitos são constituídos geralmente por uma fase matriz com um ou mais tipos de reforços em sua estrutura, exibindo uma adesão entre esses componentes. As propriedades desse material apresentam um balanceamento entre as propriedades dos materiais que o constituem, resultando em um material com propriedades superiores ao da fase matriz [4]. A Figura 2 mostra uma classificação quanto aos tipos e formas de materiais que podem constituir um compósito.

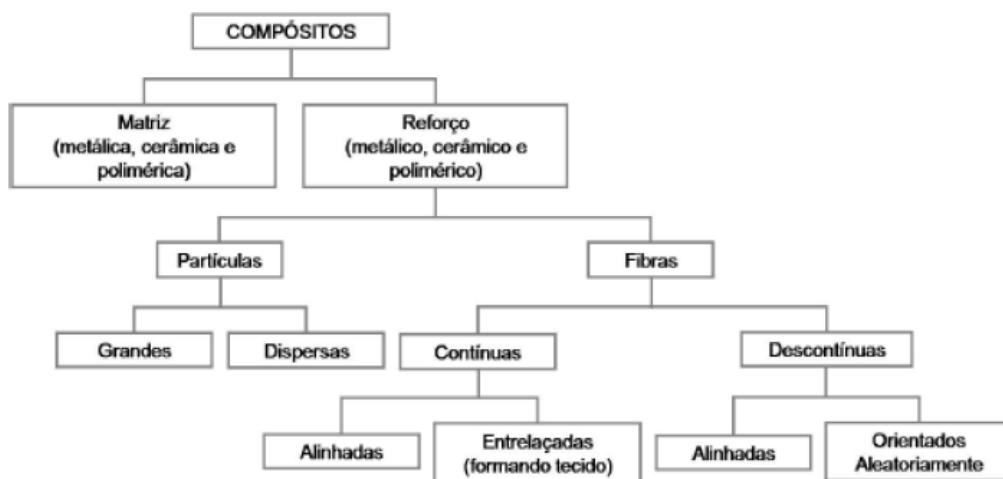


Figura 2 - Classificação dos materiais compósitos [5].

Compósitos são projetados de maneira que o reforço suporte as cargas mecânicas que a estrutura é submetida em operação. Suas propriedades variam de acordo com o tipo de matriz (metálica, cerâmica, e polimérica), tipo de reforço (fibras ou partículas), geometria do reforço (forma, tamanho, distribuição e orientação) e a interface matriz reforço (ligação adesiva). Essas variáveis devem ser cuidadosamente controladas para se produzir um material estruturalmente otimizado nas circunstâncias de uso [6]. A interface matriz-reforço é responsável pela transferência ao reforço das solicitações que a matriz é submetida. Caso a adesão entre esses elementos seja ineficaz, a resistência do compósito é prejudicada, pois o reforço atuará como um concentrador de tensões [7].



Tecnologicamente, os compósitos mais importantes são aqueles em que o reforço encontra-se na forma de fibras. Os projetos de compósitos reforçados por fibra tem o intuito de apresentar alta resistência. Compósitos de matriz polimérica são aqueles que possuem um polímero com alto peso molecular na fase matriz e fibras como meio de reforço [8].

As vantagens desses materiais aparecem quando o módulo por unidade de peso (módulo específico) e resistência por unidade de peso (resistência específica) é considerado. O alto módulo e resistência específica significa que o peso dos componentes pode ser reduzido sem perda das propriedades mecânicas. Este fator é de grande importância na movimentação de componentes. Especialmente em todas as formas de transporte, onde a redução de peso resulta em maior economia de energia. A Tabela 1 mostra algumas aplicações de compósitos de matriz polimérica em diferentes áreas [9].

Tabela 1 - Aplicações de compósitos de matriz polimérica reforçados por fibras em diferentes áreas[9].

| <b>Indústria</b> | <b>Exemplos</b>  |
|------------------|--|
| Aeronaves        | Asas, fuselagens, trem de aterrissagem e hélices de helicóptero. |
| Automóveis       | Carrocerias, painéis frontais, para-choques, molas e assentos.   |
| Barcos           | Cascos, convés e mastros.  |
| Química          | Tubulações, tanques, vasos de pressão.                           |
| Móveis           | Cadeiras, mesas e escadas.                                       |
| Elétrico         | Painéis, comutadores e isolantes.                                |
| Esportes         | Vara de pescar, tacos de golf, piscinas e esquis.                |

## **2.2) Matriz Polimérica**

Um polímero pode ser definido como uma macromolécula composta por muitas (dezenas de milhares) unidades de repetição denominadas meros, ligadas por ligações covalente. A matéria-prima para a produção de um polímero é o monômero, isto é, uma molécula com uma (mono) unidade de repetição [10]. Eles são divididos em duas grandes categorias: os termoplásticos e termofixos.

Nos polímeros termoplásticos, moléculas individuais não são quimicamente ligadas (Figura 3a). Elas são unidas por ligações secundárias ou forças intermoleculares, como as de Van der Waals e ligações de hidrogênio. Com a aplicação de calor, estas ligações secundárias que formam polímero termoplástico no sólido, podem ser temporariamente interrompidas e as moléculas podem se movimentar umas em relação às outras ou na direção do fluxo para adquirir uma nova configuração, quando uma pressão é aplicada sobre elas. No resfriamento, as moléculas podem ser orientadas em sua nova configuração, as ligações secundárias são assim restauradas, resultando numa nova forma sólida do polímero. Assim, um polímero termoplástico pode ser fundido pelo calor e reformulado muitas vezes, conforme desejado [11].

Em um polímero termofixo, por outro lado, as moléculas são quimicamente unidas entre si por ligações cruzadas (cross-links), formando uma estrutura rígida e tridimensional (Figura 3b). Uma vez que estas ligações cruzadas são formadas durante a reação de polimerização (também chamada de reação de cura), o polímero termofixo não pode ser derretido pela aplicação de calor e pressão. No entanto, se o número de ligações cruzadas é baixo, pode ser possível flexibilizar-se em elevadas temperaturas [11].

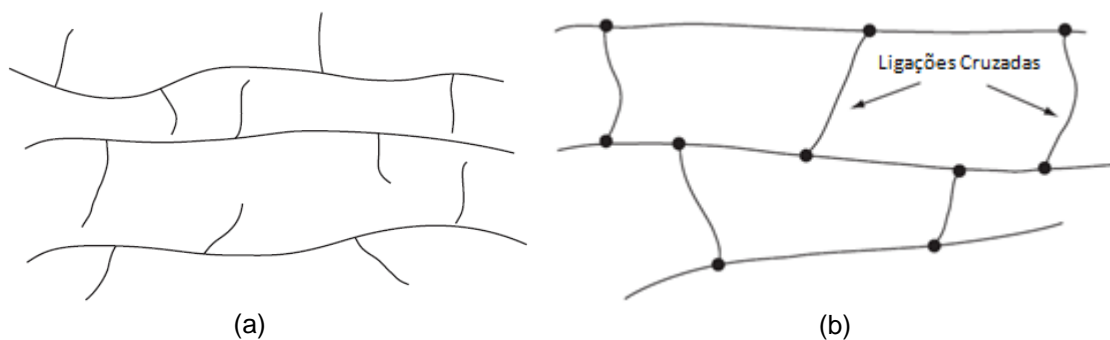


Figura 3 - Esquema representativo de (a) um polímero termoplástico e (b) um polímero termofixo [11].

Compósitos de matriz polimérica consistem em uma matriz de polímero, termofixo ou termoplástico, geralmente apresentando fibras como meio de reforço, as quais podem ser de vidro, boro, carbono e Kevlar. Os polímeros são particularmente atraentes como matrizes, devido à sua capacidade de processamento relativamente simples, baixa densidade e boas propriedades mecânicas e dielétricas. Em compósitos de matriz polimérica, como em todos os materiais compósitos, a matriz tem a função de transferir tensões para as fibras [1].

Tradicionalmente os polímeros termofixos são os mais usados como matriz em compósitos estruturais, pois devido à sua baixa viscosidade, são de simples processamento. Entre estes, epóxis, poliéster e vinil destacam-se no emprego em matrizes de compósitos de alto desempenho [12].

### 2.2.1) Resinas epóxi

Resinas epoxídicas são termorrígidos de alto desempenho que contém pelo menos dois grupos epóxis terminais, compostos por um átomo de oxigênio ligado a dois de carbono, conforme mostra a Figura 4. Em seu estado inicial, apresenta-se como um líquido orgânico de baixo peso molecular. Além disso, apresentam um baixo peso molecular. [11,13].

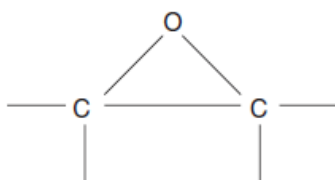


Figura 4 - Grupo epoxídico [11].

As resinas epóxi mais utilizadas têm como precursor o diglicidil éter de Bisfenol A (DGEBA), cuja estrutura básica é mostrada na Figura 5. Esse tipo de resina é formada a partir da reação entre a epicloridrina e o Bisfenol-A [12].

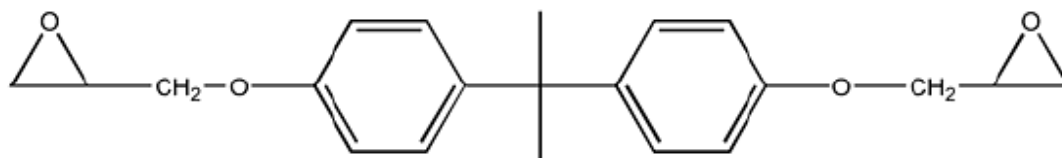


Figura 5 - Estrutura química do diglicidil éter do bisfeno-A (DGEBA) [4].

A transformação dessas resinas em sólidos cristalinos ocorre a partir da reação de cura, na qual ocorre a formação de uma rede altamente reticulada no material pela formação das ligações cruzadas. Essa reação ocorre com a adição de agentes de cura (também conhecido como endurecedor), que são usados em quantidades estequiométricas com a resina epóxi [14,12].

Esses agentes podem ser alcalinos, como amidas e bases de lewis ou ácidos, como fenóis e ácidos orgânicos. Além disso, pode-se adicionar facultativamente um agente acelerador, que aumenta a velocidade da reação. O aumento da temperatura também favorece a velocidade das reações [14,12].

A proporção entre resina e agente de cura influencia o comportamento mecânico das resinas epóxi. Diferentes agentes de cura e condições de cura variam a densidade de ligações cruzadas, impactando sobre as deformações plásticas do material [15].

SOBRINHO [5] em seu trabalho utilizou como matriz resina epóxi do tipo DGEBA misturada com agente tenacificante de borracha poliacrilonitrila butadieno carboxilado (CTBN), nas proporções de 0, 5, 10 e 15% e como reforço fibra de vidro do tipo-S2 de alta resistência para a confecção de laminados, tubos por enrolamento filamentar e corpos de prova para ensaio de tração em anel. Através de ensaios mecânicos de tração, foi observado na caracterização da matriz que o aumento de CTBN promoveu uma redução nas tensões de ruptura e um aumento significativo nas deformações de ruptura dos corpos de prova. Já para os corpos de prova dos laminados, com o aumento do teor de CTBN, houve um aumento nas tensões e deformações de ruptura. O mesmo comportamento foi observado nos ensaios de tração em anel. Nos tubos compósitos, caracterizados quanto à pressão interna e externa por ensaios hidrostáticos, também houve um aumento das pressões de falha com o aumento da quantidade de CTBN.

### **2.3) Reforço**

Como mencionado anteriormente, compósitos podem ser reforçados por fibras ou partículas. No entanto, os reforçados por fibras são responsáveis pela maioria das aplicações tecnológicas.

Fibras contínuas são materiais que exibem uma alta razão de aspecto, ou seja, possuem um comprimento muito grande em relação ao diâmetro, fazendo com que a resistência das fibras se aproxime da resistência teórica coesiva entre camadas adjacentes de átomos, proporcionando também maior flexibilidade [1,6]. Além do mais, outras propriedades da fibra, como a orientação, comprimento crítico e fração volumétrica de fibras podem influenciar no comportamento do compósito.

Quanto à orientação, fibras podem apresentar um comportamento anisotrópico, ou seja, quando tensões são aplicadas transversalmente, não há uma resistência tão efetiva. Já quando tensões são aplicadas longitudinalmente, observa-se a resistência máxima da fibra. Dessa forma, essa propriedade pode ser útil no projeto de compósitos reforçados por fibras contínuas, pois é possível colocá-las orientadas em relação às máximas tensões atuantes na estrutura, economizando-se material [9,8].

Um comprimento crítico de fibra é necessário para que o aumento da resistência e enrijecimento do compósito seja efetivo. Tal comprimento crítico ( $l_c$ ) varia em função do diâmetro da fibra ( $d$ ), de sua tensão máxima de resistência ( $\sigma_f^*$ ) e da tensão de cisalhamento entre fibra e matriz ( $\tau_c$ ), conforme a equação 1 [8].

$$l_c = \frac{\sigma_f^*}{\tau_c} \times \frac{d}{2} \quad \text{eq. 1}$$

Quando o comprimento da fibra ( $l$ ) é menor que  $l_c$ , a máxima tensão suportada pela fibra não alcançará  $\sigma_f^*$ , tornando o reforço pouco eficaz (figura 6a). Se  $l$  é igual a  $l_c$ , a tensão suportada pela fibra será igual a  $\sigma_f^*$  (Figura 6b). Já para  $l$  maior que  $l_c$ ,  $\sigma_f^*$  é atingida em grande parte do comprimento da fibra, exceto para uma distância  $l_c/2$  a partir das extremidades (Figura 6c). Portanto, o reforço será mais efetivo quando  $l$  for muito maior que  $l_c$ , ou seja, usando fibras contínuas [8,11].

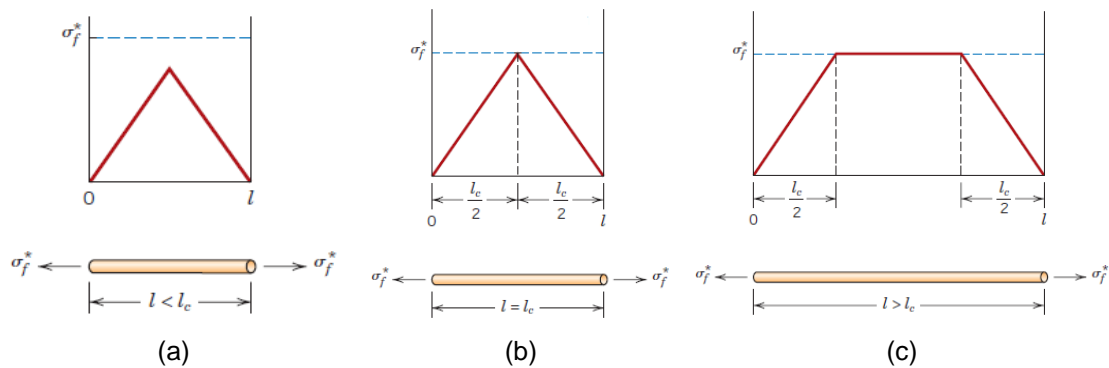


Figura 6 – Perfis tensão x posição quando ao comportamento da fibra é (a) menor que o crítico; (b) igual ao crítico e (c) quando é maior que o crítico.

Em relação à quantidade de fibras no compósito, quanto maior a fração volumétrica de fibras, maiores valores de resistência serão alcançados. No entanto, as frações volumétricas de fibra devem obedecer a uma faixa máxima para que continue havendo interação fibra-matriz. Quando um compósito é composto por mais de um tipo de fibra, ele pode ser chamado de híbrido.

### 2.3.1) Fibra de vidro

O tipo de fibra mais comumente utilizado como reforço em compósitos de matriz polimérica é a fibra de vidro [13]. Tais fibras apresentam uma grande variedade de óxidos em sua composição química, sendo a sílica ( $\text{SiO}_2$ ) o óxido que ocupa maior teor em sua composição. Existem três principais tipos de fibra de vidro, que recebem a nomenclatura de E, C e S. A letra E (*eletrica*) representa o tipo E, por ser um bom isolante elétrico. A designação C (*corrosion*), pelo fato da fibra tipo C apresentar boas propriedades anticorrosivas. A letra S indica o tipo S, que apresenta elevada resistência mecânica [7]. A tabela 2 apresenta a composição química desses diferentes tipos de fibras.

Tabela 2 – Composição química de alguns tipos de fibra de vidro em peso (%) [7].

| Óxido                   | Tipo E | Tipo C | Tipo S |
|-------------------------|--------|--------|--------|
| $\text{SiO}_2$          | 55,2   | 65,0   | 65,0   |
| $\text{Al}_2\text{O}_3$ | 8,0    | 4,0    | 25,0   |
| $\text{CaO}$            | 18,7   | 14,0   | -      |
| $\text{MgO}$            | 4,6    | 3,0    | 10,0   |
| $\text{Na}_2\text{O}$   | 0,3    | 8,5    | 0,3    |
| $\text{K}_2\text{O}$    | 0,2    | -      | -      |
| $\text{B}_2\text{O}_3$  | 7,3    | 5,0    | -      |

Filamentos contínuos de fibra de vidro são produzidos a partir da pelotização e fusão dos materiais envolvidos. O material fundido é então prensado contra um conjunto de fieiras, produzindo assim os filamentos, os quais são comercializados geralmente na forma rovings [9]. Após o processo de fabricação, as fibras podem ser recobertas com agentes ligantes, com objetivo de promover uma melhor adesão entre a superfície da fibra e a matriz polimérica. Esses agentes ligantes pertencem geralmente ao grupo dos organossilanos, que apresentam uma estrutura do tipo  $\text{X}_3\text{SiR}$ . O grupamento R é responsável pela adesão à matriz polimérica, já o grupo X é o percussor da adesão à fibra [13].

Deve-se salientar que mais de 90% de filamentos contínuos de fibra de vidro são do tipo E, por apresentarem boa flexibilidade e resistência, inércia química e baixo peso específico [9,17].

## 2.4) Enrolamento filamentar

Diversas técnicas são empregadas na produção de artefatos compósitos reforçados com fibras e matriz polimérica. Dentre as principais, pode-se citar a laminação manual, moldagem por transferência de resina, spray up, Vacuum bagging, pultrusão, e enrolamento filamentar. Dessas, o processo de enrolamento filamentar destaca-se na produção de tubos compósitos com filamentos contínuos e matriz polimérica.

A técnica de enrolamento filamentar consiste em um processo segundo o qual as fibras são posicionadas de maneira precisa e de acordo com um padrão predeterminado para compor uma forma oca (geralmente cilíndrica). As fibras, na forma de fios individuais ou de mechas, são primeiramente alimentadas através de um banho de resina (móvel) e em seguida enroladas continuamente ao redor de um mandril, em geral utilizando equipamentos de enrolamento automáticos, conforme mostra a Figura 7 [8]. Após o processo de enrolamento filamentar, a matriz polimérica sofre o processo de cura, que pode ser a frio ou a quente. No caso de cura a quente, o mandril é colocado em uma estufa.

Dentre algumas aplicações de enrolamento filamentar, destacam-se eixos de direção automotiva, hélices de helicópteros, tanques de oxigênio, tubos, vasos de pressão esféricos, caixas cônicas de motor de foguete e uma larga variedade de tanques de armazenamento de gasolina [11].

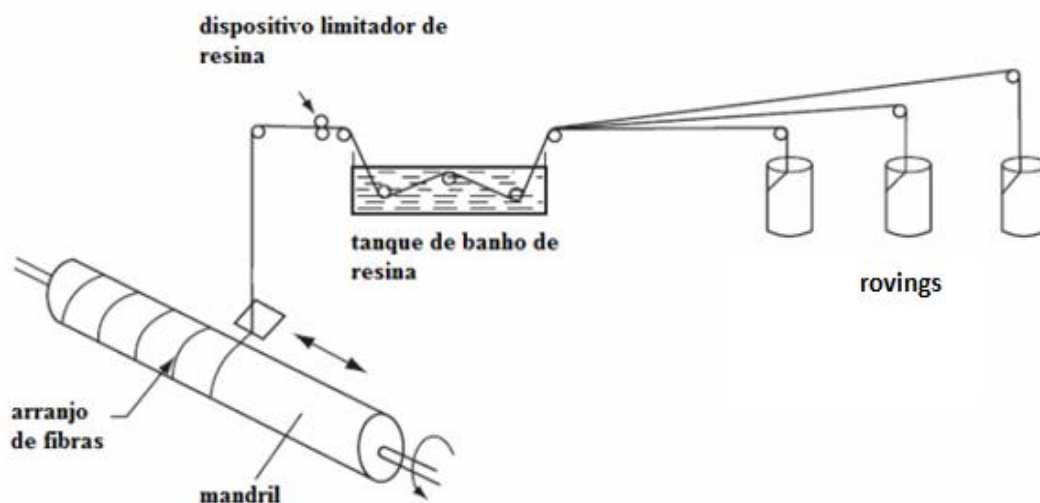


Figura 7 - Esquema do método de enrolamento filamentar [12].

Diversas formas de enrolamento são possíveis, destacando-se a circunferencial, helicoidal e polar. A forma circunferencial é uma das mais simples, as fibras vão sendo enroladas aproximadamente na direção normal ao eixo do mandril e é usualmente combinada com o enrolamento helicoidal em peças mais complexas. Na forma helicoidal, as fibras são enroladas formando um determinado ângulo com o eixo do mandril. O método pode ser usado para enrolar desde as mais simples até as mais complicadas formas. Já a forma polar, os filamentos são enrolados em baixo ângulo com o eixo do mandril (próximo a  $0^\circ$ ), podendo as fibras passar próximas ou ao redor dos pólos do mandril, tangenciando as extremidades da peça [16]. A Figura 8 mostra os modos de enrolamento descritos.

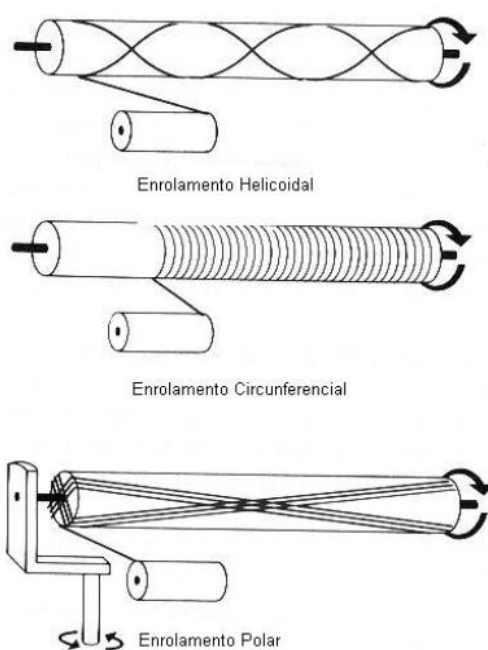


Figura 8 - Representação das formas de enrolamento filamental [8].

Em relação à geometria, a técnica de enrolamento filamental apresenta algumas variáveis, como as velocidades do mandril ( $M$ , em rotações por minuto) e do “carrinho” ( $V_c$ ), no qual se encontra o banho de resina e a alimentação de fibras. O passo da hélice ( $p$ ), ou seja, a distância percorrida pelo “carrinho” no intervalo de tempo em que o mandril realiza uma rotação, o número de passes ( $n$ ) requerido para a cobertura completa do mandril, a largura da faixa ( $W$ ) e o ângulo de enrolamento ( $\varphi$ ) também influenciam no processo de enrolamento, como pode ser observado na Figura 9 [17]. Os ajustes dessas variáveis podem ser feitos na própria máquina e influenciam nas propriedades mecânicas finais do artefato composto.



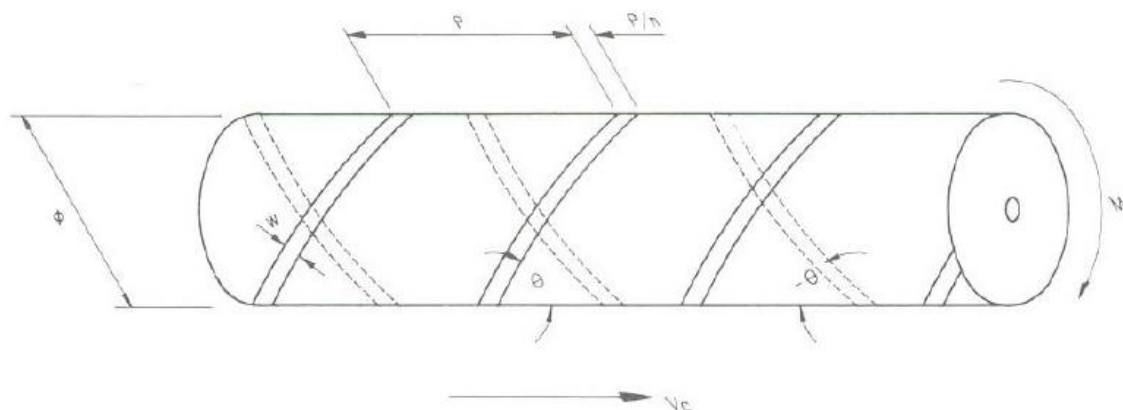


Figura 9 - Esquema da geometria do processo de enrolamento filamentar [17].

## 2.5) Ensaio hidrostático de pressão interna

Ensaio hidrostático de pressão interna são geralmente realizados em tubulações submetidas à pressão interna e outros tipos de carregamento, objetivando simular as condições de trabalho do material e determinando sua resistência. Nesse teste, bombas injetam líquido em um tubo vedado, aumentando a pressão interna e fazendo com que o mesmo falhe.

Tubos submetidos a vários esforços simultâneos apresentarão em cada elemento da parede três tensões normais e outras três cisalhantes, que são: tensão longitudinal ( $\sigma_{zz}$ ), tensão circunferencial ( $\sigma_{\theta\theta}$ ) e tensão radial ( $\sigma_{rr}$ ). As tensões de cisalhamento  $\tau$  atuam em cada um dos planos ortogonais perpendiculares às tensões normais [3]. A Figura 10 mostra um esquema das tensões atuantes.

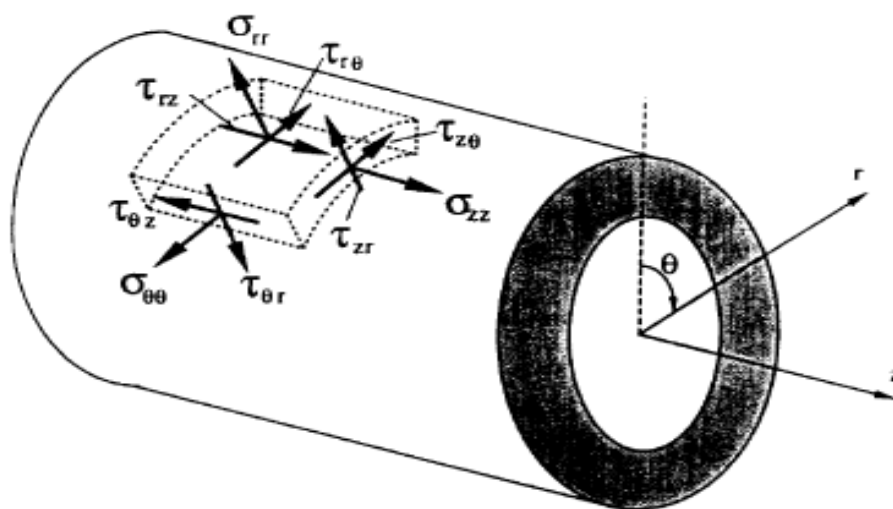


Figura 10 - Representação das tensões atuantes em uma tubulação [3].

A tensão longitudinal é composta pelas parcelas das resultantes da pressão, momento fletor (devido aos diversos pesos e sobrecargas), momentos fletores das dilatações térmicas, movimentos dos suportes e pontos extremos, tensões de montagem e cargas axiais. A tensão circunferencial é composta pelas parcelas das resultantes da pressão (é geralmente a tensão predominante) e do achatamento local do tubo em consequência dos diversos momentos fletores atuantes. Já a tensão radial é causada exclusivamente pela pressão, sendo seu valor geralmente baixo em tubos de parede fina, podendo assim ser desprezado nos cálculos [3,16].

As tensões cisalhantes que atuam no plano perpendicular ao eixo do tubo são provenientes dos momentos de torção, geralmente como resposta às dilatações térmicas. As outras tensões cisalhantes são provenientes dos diversos momentos fletores que atuam sobre o tubo [16].

Segundo MEIJER e ELLYIN [18], devido à estrutura anisotrópica, compósitos reforçados com fibra de vidro e matriz epóxi apresentam vários mecanismos de falha dependendo do estado de tensão. Na aplicação de tubo compósito há a diferença entre a falha funcional, quando o tubo já não serve o seu propósito para conter um fluido, e falha estrutural, quando o tubo não pode resistir a qualquer outra carga estrutural.

BAI *et al.* [19] investigaram o comportamento mecânico de tubos de fibra de vidro com três camadas, orientadas à  $\pm 55^\circ$  e com matriz epóxi, sob três diferentes tipos de carregamento: tensão pura, pressão interna pura e um carregamento

combinado. O trabalho discutiu os mecanismos de danos nestas condições. Constataram que o processo de danos e falhas pode ser descrito por três passos: a iniciação do processo de danos por microtrincamento, delaminação entre as diferentes camadas, e desenvolvimento e coalescência de fendas. Além disso, confirmaram que em que as zonas livres de fibras, fendas matriciais ocorrem perpendicularmente à direção de tensão. Nas zonas onde a fração de volume de fibra é baixa, as microtrincas se propagam ao redor de feixes de fibras. Zonas de elevada fração volumétrica de fibras, as microtrincas se propagam nas interfaces fibra / matriz.

MARTINS *et al.* [20] avaliaram a falha funcional e estrutural de tubos fabricados por enrolamento filamentar, utilizando fibra de vidro tipo E e resina epóxi, apenas com camadas helicoidais, nas configurações:  $[\pm 45^\circ]_4$ ;  $[\pm 55^\circ]_4$ ;  $[\pm 60^\circ]_4$  e  $[\pm 75^\circ]_4$ . Nos testes hidrostáticos de pressão interna foi utilizado um aparato capaz de produzir um carregamento [2H:1A] nos tubos, indicado na Figura 11. Um liner de PVC (policloreto de vinila) foi introduzido nos tubos para os ensaios de verificação da falha estrutural, objetivando a estanqueidade dos tubos até a falha.

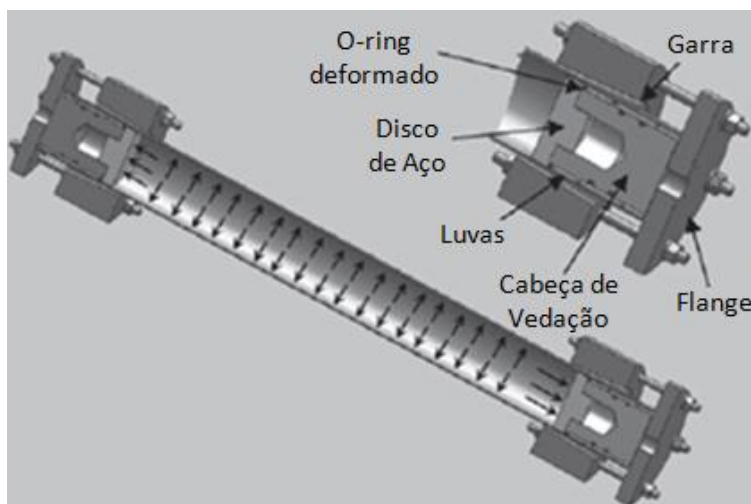


Figura 11 - Ilustração do aparato utilizado no teste hidrostático [20].

Nos testes para verificar a falha funcional, o tubo de configuração  $[\pm 55^\circ]_4$  apresentou os maiores valores de pressão de vazamento. Para os testes de falha estrutural, além dos resultados experimentais, foi feita uma análise numérica, comparando os resultados. Foi observado que tanto nos resultados experimentais quanto na análise numérica, que o tubo com a configuração de  $[\pm 55^\circ]_4$  apresentou os maiores valores de pressão de explosão, seguido pelos tubos de configurações  $[\pm 60^\circ]_4$ ,  $[\pm 45^\circ]_4$  e  $[\pm 75^\circ]_4$ . A Figura 12 mostra a superfície de falha dos tubos.

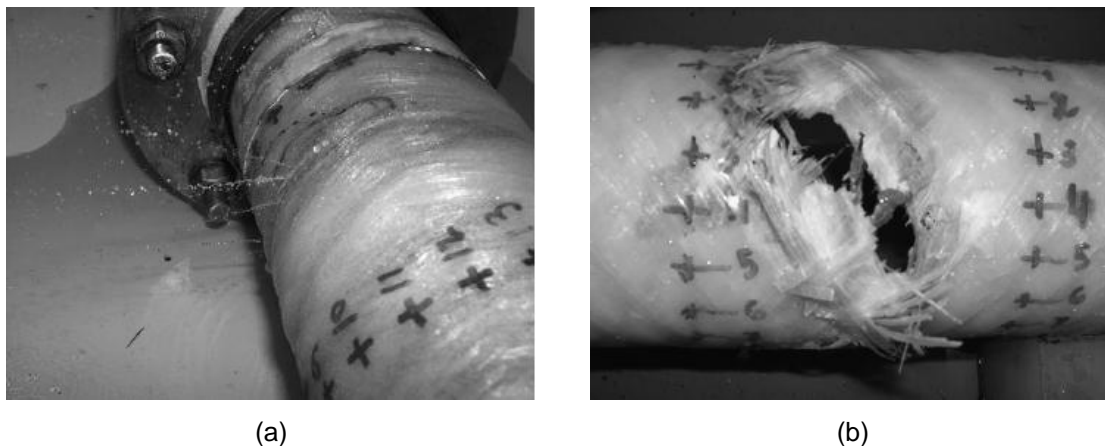


Figura 12 - Superfície de falha (a) funcional do tubo  $[\pm 75^\circ]_4$ ; (b) estrutural do tubo  $[\pm 55^\circ]_4$  [20].

Em seu estudo, MERTINY *et al.* [21] testaram o desempenho de tubos compósitos fabricados por enrolamento filamentar, usando fibra de vidro tipo E e resina epóxi. Os tubos apresentavam configurações  $[\pm 60^\circ]_3$ ,  $[\pm 45^\circ, \pm 60^\circ]_2$  e  $[\pm 30^\circ, \pm 60^\circ]_2$ , as quais foram submetidas a testes hidrostáticos de pressão interna para se avaliar a falha funcional e estrutural. Concluíram que os modos de falha dependem fortemente da razão de tensão aplicada, e os danos na matriz podem ser minimizados usando a configuração  $[\pm 30^\circ, \pm 60^\circ]_2$ . Configurações de  $[\pm 45^\circ, \pm 60^\circ]_2$  e  $[\pm 30^\circ, \pm 60^\circ]_2$  mostraram maior resistência estrutural e funcional em comparação com a  $[\pm 60^\circ]_3$ , sob relações circunferencial/axial menor do que um. A configuração  $[\pm 60^\circ]_3$  apresentou melhor desempenho em carregamento circunferencial puro. Configurações multi-ângulo de enrolamento apresentaram melhor resistência para o carregamento [2H: 1A], o qual está geralmente presente em vasos de pressão.

## 2.6) Ensaio de tração em anel

Ensaio de tração em anel (Split-disk tests) são realizados segundo a norma ASTM D 2290 [23] e através deles é possível determinar a tensão circunferencial de falha em tubos compósitos fabricados por enrolamento filamentar [22].

Nesse tipo de ensaio, cinco amostras são retiradas dos tubos e usinadas, conforme recomendação da norma. Duas metades de disco são introduzidas no corpo de prova e fixadas com pinos às garras, as quais têm suas extremidades fixadas na máquina de tração. O corpo de prova deve apresentar dois entalhes na mesma

direção, os quais são posicionados perpendicularmente à linha de separação dos discos, garantindo que a ruptura do corpo de prova ocorra especificamente nessas regiões quando tracionado. A Figura 13 mostra o esquema desse tipo de ensaio.

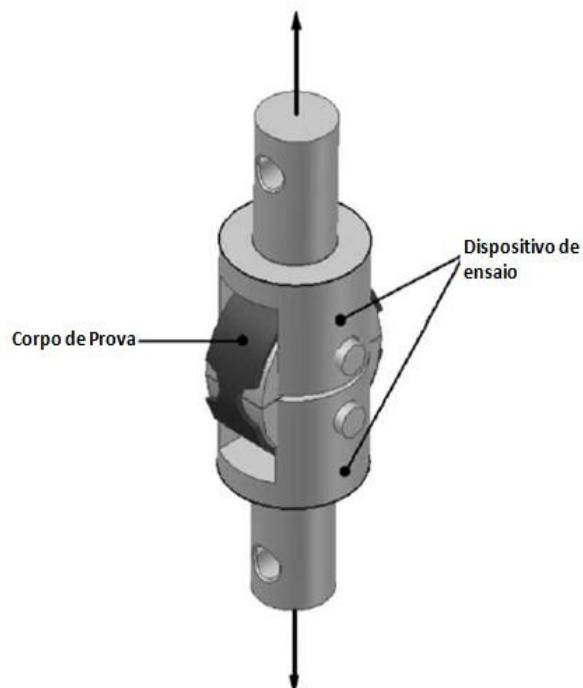


Figura 13 - Esquema representativo do ensaio de tração em anel [22].

KAYNAK *et al.* [22] realizou ensaios de tração em anel em corpos de prova retirados de tubos fabricados por enrolamento filamental, feitos com dois tipos de resina epóxi, fibras de vidro ou carbono de diferentes fabricantes, apresentando apenas camadas helicoidais orientadas à  $0^\circ$ ,  $\pm 25^\circ$ ,  $\pm 45^\circ$ ,  $\pm 65^\circ$  e  $\pm 90^\circ$ . Nos resultados apresentados, pôde-se verificar um significativo aumento nos valores de tensão de ruptura com o aumento do ângulo de enrolamento, principalmente a partir de ângulos de  $45^\circ$ . A figura 14 mostra o comparativo dos resultados, sendo as fibras 3 e 5 de carbono e as fibras 1,2 e 4 de vidro.

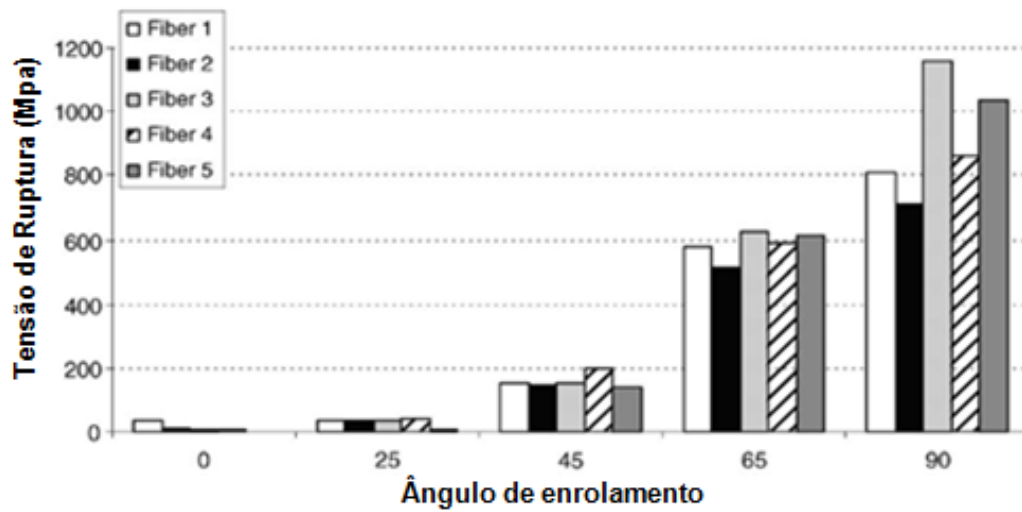


Figura 14 - Comparação entre a tensão de ruptura de diferentes tipos de fibra com a variação do ângulo de enrolamento [22].

### 3) Materiais e Métodos

Serão descritos nesta seção os materiais e as metodologias usados na fabricação e caracterização dos tubos compósitos.

#### 3.1) Materiais

Nesta seção serão apresentados os materiais utilizados na matriz polimérica e reforço dos tubos.

##### 3.1.1) Matriz polimérica

A matriz polimérica utilizada é formada pela mistura de resina epóxi do tipo DGEBA, denominada MY750 e de nome comercial Araldite®, endurecedor HY2918 e acelerador DY062, nas proporções de 100%, 85% e 2%, respectivamente. Todos esses componentes da marca HUNTSMAN, e o polímero é indicado para aplicações que requerem alto desempenho.

Esse sistema polimérico é de cura à quente, apresentando um ciclo de duas horas a 80°C, seguido de mais duas horas a 120°C, conforme indicação do fabricante.

A Tabela 3 mostra algumas propriedades do sistema polimérico fornecidas pela HUNTSMAN.

Tabela 3 - Propriedades da mistura.

| Propriedade            | Métodos   | Resultados |
|------------------------|-----------|------------|
| Dureza Shore D         | DIN 53505 | 76         |
| Alongamento            | ISO 527   | 2%         |
| Módulo de Elasticidade | ISO 527   | 3,627 GPa  |

Fonte: Huntsman Ltda.

### **3.1.2) Reforço**

Foram utilizadas fibras de vidro do tipo E produzidas pela Owens Corning, dispostas em rovings, como reforço para os tubos. Essa fibra apresenta módulo de elasticidade de 80 GPa, densidade de 2,58 g/cm<sup>3</sup> e TEX de 1100 g/km segundo o fabricante. A Figura 15 mostra o tipo roving utilizado.



Figura 15 - Roving de fibra de vidro.

## **3.2) Métodos**

Nesta seção, será descrita a metodologia utilizada na fabricação dos tubos, assim como na caracterização microestrutural e ensaios mecânicos.

### **3.2.1) Fabricação dos tubos**

Os tubos compósitos foram fabricados no Laboratório de Compósitos da COPPE/UFRJ, a partir de uma máquina de enrolamento filamental da marca TecService, com dois eixos (Figura16). Essa máquina é indicada para mandris de 30 a 500 mm de diâmetro e até 3 metros de comprimento.





Foram produzidos quatro tubos com diâmetro interno de 4" (101,6 mm) e comprimento útil de 1,70 m a partir de um mandril colapsável de 4" de diâmetro externo e comprimento de 3 m (Figura 17). Todos com uma camada circunferencial interna, duas camadas helicoidais intermediárias e uma camada circunferencial externa, nas seguintes configurações:  $[\pm 88^\circ/\pm 30^\circ_2/\pm 88^\circ]$ ,  $[\pm 88^\circ/\pm 45^\circ_2/\pm 88^\circ]$ ,  $[\pm 88^\circ/\pm 55^\circ_2/\pm 88^\circ]$ ,  $[\pm 88^\circ/\pm 60^\circ_2/\pm 88^\circ]$ .

Na preparação do mandril foi colocado um produto desmoldante a base de terebentina, da marca Hunstman, na superfície do mandril (Figura 18a) e uma folha de

teflon do tipo Armalon (Figura 18b), com o objetivo de facilitar a retirada do tubo ao final do processo.



(a)



(b)

Figura 18 - (a) Superfície do mandril impregnada com desmoldante; (b) Superfície do mandril envolvida com a folha de teflon.

Objetivando obter um melhor acabamento interno do tubo, foi colocada por cima do teflon uma camada de tecido de poliéster (figura 19), o qual foi molhado com o sistema polimérico para facilitar a adesão das primeiras camadas de fibras enroladas.



Figura 19 - Camada de tecido de poliéster envolvendo o mandril.

Após a preparação do mandril, deu-se início ao processo de enrolamento filamental. A Figura 20 mostra o início do processo, com a primeira camada de fibras. O excesso de resina é retirado com uma espátula de polietileno, conforme as fibras vão sendo enroladas no mandril.



Figura 20 - Início do processo de enrolamento filamental.

Posteriormente ao processo de enrolamento filamental, o tubo seguiu para uma estufa, onde a matriz polimérica sofreu o ciclo de cura citado anteriormente. Tal equipamento possui roletes que fazem o mandril girar em torno de seu próprio eixo (figura 21), para que o processo de cura ocorra homogeneamente em todo o tubo. Ao fim do processo o tubo, após o resfriamento, é retirado o mandril.



Figura 21 - Estufa usada para o processo de cura.

Cada tubo foi dividido em duas partes, uma de 1,10m para ensaios hidrostáticos e outra de 60 cm destinada a confecção de corpos de prova para ensaios de tração em anel. As partes selecionadas para os ensaios hidrostáticos tiveram suas extremidades reforçadas com fibras de vidro enroladas manualmente e resina de cura a frio, da marca Epoxyfiber®, a fim de garantir que a falha não ocorresse nas extremidades dos tubos durante os ensaios. Além disso, essas amostras receberam 20 marcações circunferencialmente na superfície, a cada 10 cm, objetivando um possível mapeamento no futuro para análise numérica, conforme a figura 22.



Figura 22 - Tubos compósitos ao fim do processo.

A fim de facilitar a identificação, os tubos receberam a seguinte nomenclatura de acordo com sua configuração, como mostra a Tabela 4.

Tabela 4 - Nomeclatura dos tubos fabricados por enrolamento filamentar.

| Nomeclatura | Configuração                                     |
|-------------|--|
| Tubo 1      | $[\pm 88^\circ / \pm 30^\circ_2 / \pm 88^\circ]$ |
| Tubo 2      | $[\pm 88^\circ / \pm 45^\circ_2 / \pm 88^\circ]$ |
| Tubo 3      | $[\pm 88^\circ / \pm 55^\circ_2 / \pm 88^\circ]$ |
| Tubo 4      | $[\pm 88^\circ / \pm 60^\circ_2 / \pm 88^\circ]$ |

### 3.2.2) Densidade e fração volumétrica de fibras

A densidade foi determinada pelo método de picnometria, a partir da média de cinco amostras retiradas de cada tubo, em regiões diferentes e usando um picnômetro (Figura 23).



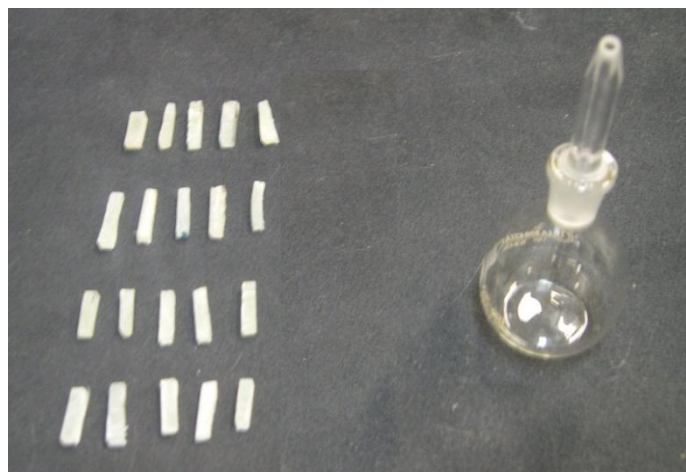


Figura 23 - Amostras e picnômetro utilizado para medição de densidade.

O picnômetro totalmente preenchido com água destilada foi pesado em uma balança de precisão, da marca Gehaka, assim como cada amostra. Em seguida, cada amostra, separadamente, foi colocada no picnômetro totalmente preenchido com água destilada e pesou-se o conjunto. Desta forma, a partir da diferença entre as massas e conhecendo a densidade da água destilada ( $0,99753 \text{ g/cm}^3$ ), foi possível calcular o volume de água deslocado pela amostra no picnômetro com água, obtendo-se então a densidade do compósito.

A fração volumétrica de fibras foi obtida pelo método de queima, no qual foram utilizados cadinhos e três amostras de cada tubo. Os cadinhos e as amostras foram pesados na balança de precisão.

Após tal procedimento, cada amostra foi colocada dentro de um cadinho (Figura 24) e levadas ao forno mufla do Laboratório de Tratamentos Térmicos do Programa de Engenharia Metalúrgica e de Materiais da COPPE/UFRJ, permanecendo por duas horas a  $500^\circ\text{C}$  para a queima da fase matriz.

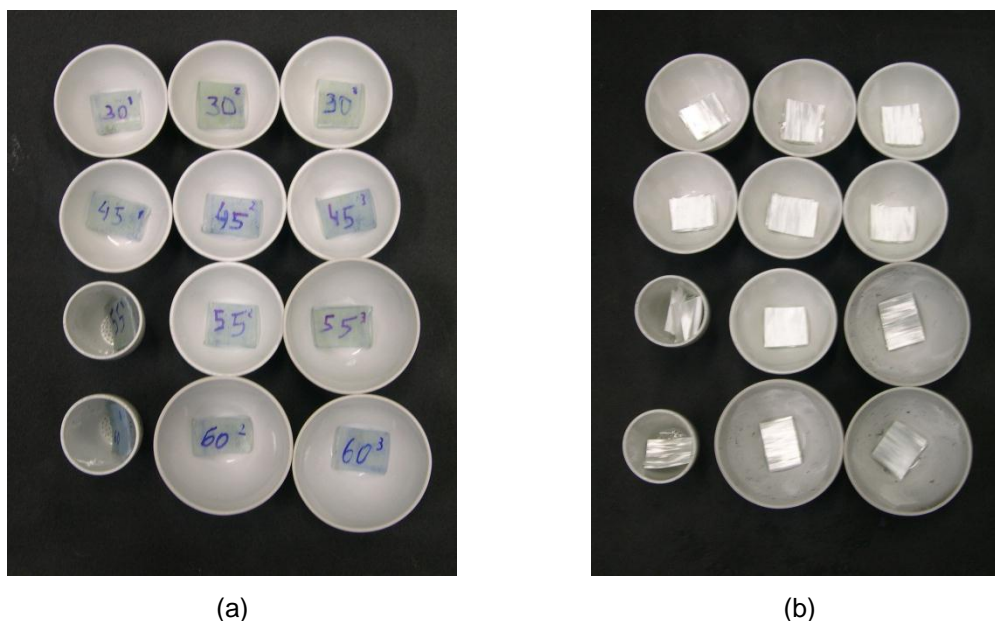


Figura 24 - (a) Amostras antes da queima; (b) Amostras após queima.

Ao término, cada cadinho juntamente com as fibras resultantes foi pesado e pela diferença das massas, a fração volumétrica de fibras pôde ser obtida através da equação 2.

$$V_f = \frac{m_f \times \rho_c}{\rho_f \times m_c} \quad \text{eq. 2}$$

Sendo:

$V_f$  = fração volumétrica de fibras,

$m_f$  = massa de fibras em gramas,

$\rho_c$  = densidade do compósito em g/cm³,

$\rho_f$  = densidade de fibras em g/cm³,

$m_c$  = massa do compósito em gramas.

### 3.2.3) Medições de diâmetro interno e espessura

Na medição do diâmetro interno, foi utilizado um paquímetro digital da marca Starret, realizando-se uma medição a cada 18° nas extremidades dos tubos. Resultando em um total de 20 valores por tubo, podendo assim determinar o diâmetro interno médio e, conseqüentemente, o raio interno médio de cada tubo de cada tubo.

A determinação das medidas de espessura foi feita diretamente em cada tubo, utilizando o mesmo paquímetro digital. Foram feitas seis medições em cada extremidade, além de medições feitas nas amostras utilizadas para determinação de densidade e fração volumétrica de fibras. Obteve-se um total de 20 medições por tubo. A partir desses resultados, foi possível determinar a espessura média de cada tubo.

### **3.2.4) Análise Microestrutural**

A análise microestrutural foi feita a partir da retirada de uma amostra de cada tubo, na direção perpendicular ao eixo do tubo para microscopia óptica, com aumento de 100x.

As amostras foram embutidas em uma resina de cura a frio e lixadas em uma sequência de lixas de 180, 320, 400, 600 e 1200 mesh respectivamente. Em seguida as mesmas foram polidas em alumina 1 e 2. A Figura 25 mostra as amostras preparadas para microscopia.



Figura 25 - Amostras embutidas e preparadas para microscopia.

Após esse procedimento, as amostras foram observadas em um microscópio da marca Olympus®, modelo BX60M, no Programa de Engenharia Metalúrgica e de Materiais da COPPE/UFRJ.

### 3.2.5) Ensaios Hidrostáticos de Pressão Interna

Os ensaios hidrostáticos foram realizados no Laboratório de Compósitos da COPPE/UFRJ, usando um dispositivo (Figura 26) composto por uma bomba hidropneumática da marca Haskel com capacidade de pressurização de até 10000 psi (69 MPa) com acionamento pneumático (Figura 26a), uma câmara de proteção (Figura 26b) e um computador ligado a um sistema de aquisição de dados (Figura 26c). Este aparato foi construído no próprio laboratório.



(a)



(b)



(c)

Figura 26 - (a) bomba hidropneumática; (b) Câmara de testes; (c) aparato de aquisição de dados.



Objetivando simular um carregamento puramente circunferencial nos testes hidrostáticos, foi utilizada uma barra roscada solidária às cabeças de vedação (Figura 27a), impedindo assim que as cabeças exerçam tensões trativas no tubo quando pressurizado.

O sistema de vedação (Figura 27b) é composto por um disco de base, cabeças de vedação, luva, a qual fica sobre a cabeça de vedação, e um flange. Desta forma, ao apertar os parafusos que fixam o flange às cabeças de vedação, o flange desloca a luva de alumínio contra o disco, comprimindo o O-Ring. Sendo assim, o O-Ring se deforma e faz a vedação nas paredes do tubo. Vale ressaltar que a entrada de água ocorre apenas em uma cabeça de vedação.

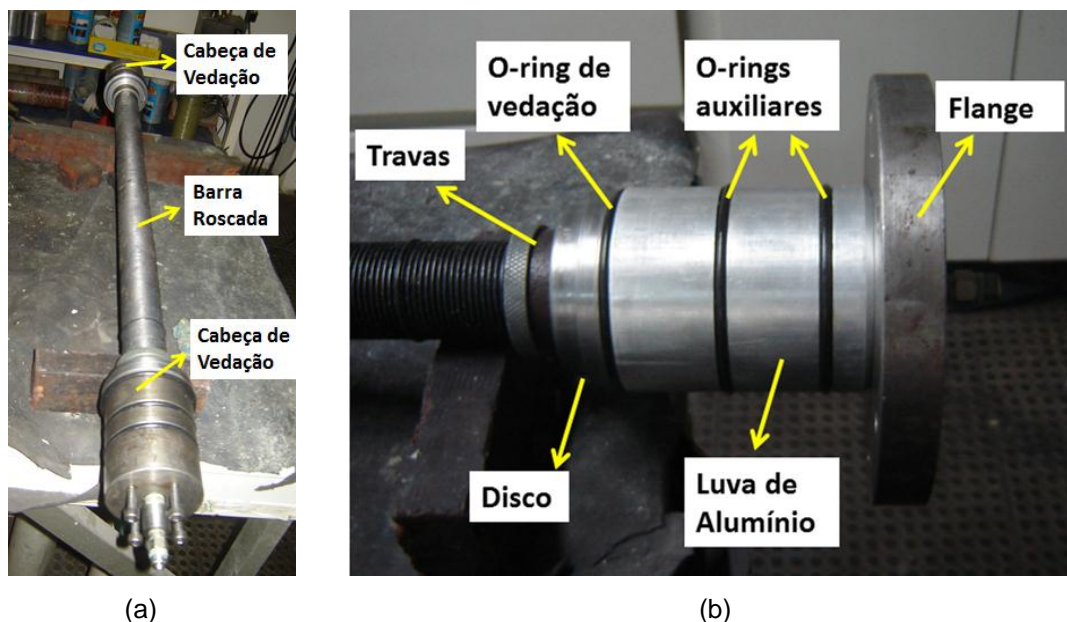


Figura 27 - (a) Barra roscada com as cabeças de vedação; (b) Sistema de vedação.

Após fazer a vedação de uma das extremidades com o sistema de vedação e colocar a barra roscada solidária a uma das cabeças, os tubos foram totalmente preenchidos com água misturada a um corante azul de modo a facilitar a identificação de vazamentos. Em seguida, foi colocada a outra parte do sistema de vedação com a cabeça solidária à outra extremidade da barra roscada. A pressão injetada pela bomba foi regulada manualmente nos ensaios, procurando-se manter a menor taxa de carregamento.

### 3.2.5.1) Ensaios hidrostáticos sem liner

Inicialmente os tubos foram testados sem liner, com a finalidade de avaliá-los quanto à falha funcional, ou seja, a falha ocorrendo preferencialmente na matriz, obtendo-se assim a pressão de vazamento. A Figura 28 mostra um dos tubos preparados para o ensaio hidrostático sem liner.

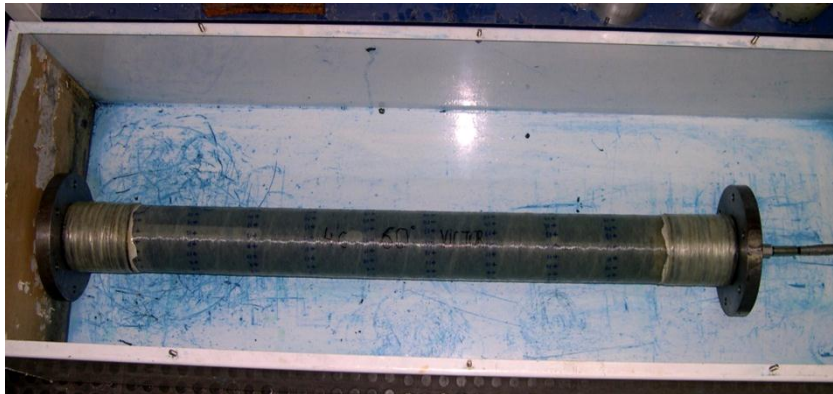


Figura 28 - Tubo com camadas helicoidais de  $\pm 60^\circ$  preparado para o ensaio hidrostático.

### 3.2.5.2) Ensaios hidrostáticos com liner

Após os ensaios para a verificação da falha funcional, foi introduzido em cada tubo um liner de PVC de 1,10 m de comprimento (Figura 29a), com o intuito de promover a estanqueidade do tubo e avaliá-lo quanto a sua falha estrutural, ou seja, a falha que promove o rompimento das fibras e consequentemente, a explosão do tubo, podendo obter assim a pressão de explosão. A Figura 29b ilustra um dos tubos preparado para o ensaio hidrostático com liner.

MARTINS *et al.* [20] realizaram um teste hidrostático de pressão interna em um tubo de PVC, obtendo uma pressão de falha de 1,24 MPa, concluindo assim que este tipo de liner não contribui para o aumento de pressão de falha estrutural do tubo.

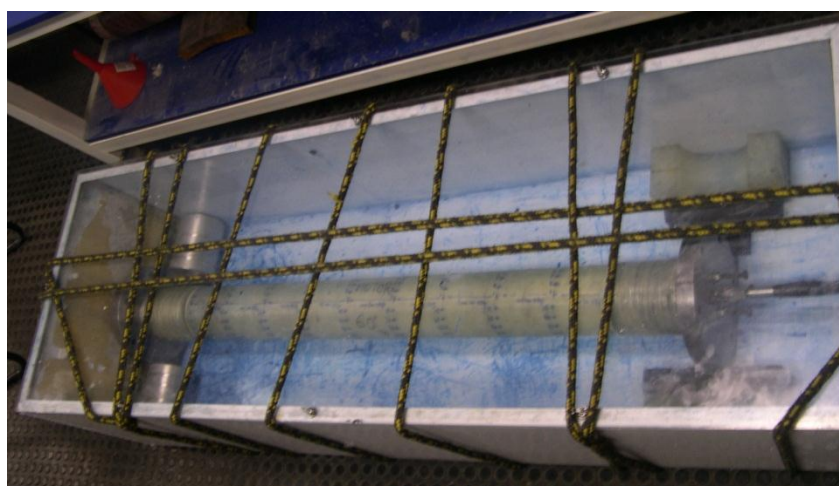
Prevendo o alcance de altas pressões de explosão, a câmara de teste foi envolvida com uma corda (figura 29c). Minimizando assim, durante a explosão, o risco de algum pedaço do tubo ultrapassar a tampa de polycarbonato e ser projetado para o meio externo.



(a)



(b)

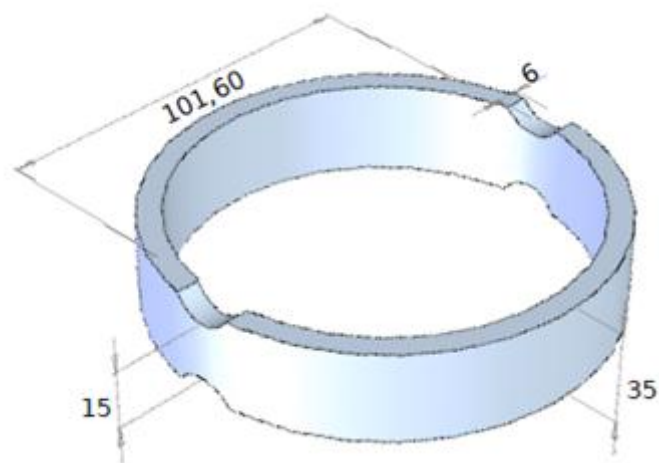


(c)

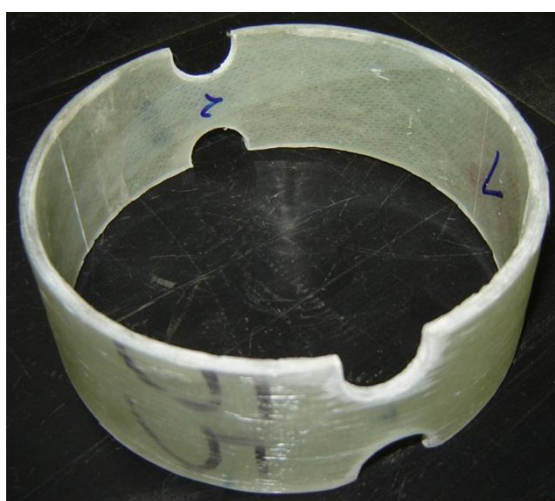
Figura 29 - (a) Liner de PVC; (b) Tubo com camadas helicoidais de  $\pm 45^\circ$  preparado para o ensaio hidrostático; (c) esquema de proteção da câmara de testes.

### 3.2.6) Ensaios de tração em anel

Os ensaios de tração em anel foram efetuados no Laboratório de Estruturas do Programa de Engenharia Civil da COPPE/UFRJ, a partir de cinco corpos de prova usinados de cada tubo (Figura 30), seguindo os procedimentos da norma ASTM D 2290.



(a)



(b)

Figura 30 - (a) Dimensões do corpo de prova [5]; (b) Corpo de prova usinado.

Foi utilizada para os ensaios uma máquina de ensaio universal Shimadzu servo-controlada com capacidade de 1000 kN, utilizando uma velocidade de deslocamento do travessão de 5 mm/min. Além disso, foi utilizado um mecanismo de garras projetado pelo Laboratório de Compósitos da COPPE/UFRJ, seguindo a norma ASTM D 2290. A figura 31 exibe um corpo de prova de anel preparado para o teste.

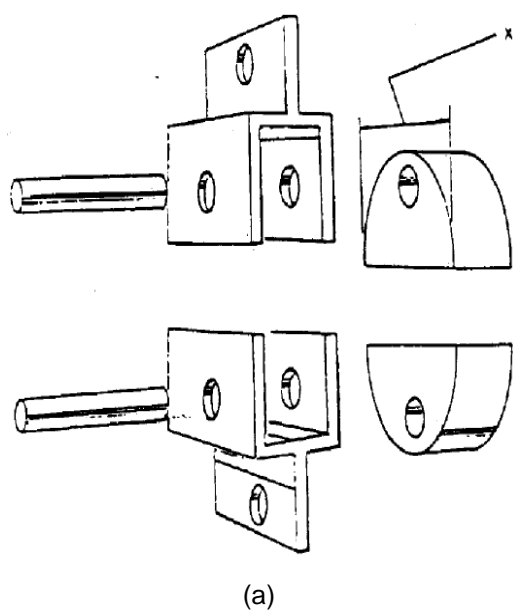


Figura 31 - (a) Esquema do mecanismo de garras [15]; (b) Corpo de prova ao início do teste.

Neste tipo de ensaio, os corpos de prova são submetidos a tensões do tipo circunferencial, isto é, há a predominância de tensões do tipo circunferencial atuando no corpo de prova, semelhante ao que ocorre nos testes hidrostáticos.

## 4) Resultados e discussões

Nesta seção serão apresentados os resultados experimentais, assim como as discussões acerca deles.

### 4.1) Densidade e fração volumétrica de fibras

A Tabela 5 mostra os resultados de densidade e fração volumétrica de fibras dos tubos.

Tabela 5 - Densidade e fração volumétrica de fibra dos tubos.

| <b>Tubo</b> | <b>Densidade Média<br/>(g/cm<sup>3</sup>)</b> | <b>Fração Volumétrica de Fibras<br/>(%)</b> |
|-------------|---|---|
| 1           | 1,57 ± 0,07                                   | 32,71 ± 0,90                                |
| 2           | 1,64 ± 0,03                                   | 37,61 ± 1,26                                |
| 3           | 1,73 ± 0,05                                   | 42,96 ± 0,92                                |
| 4           | 1,74 ± 0,06                                   | 43,37 ± 0,66                                |

Analisando os resultados, há indícios de que ao se aumentar o ângulo de enrolamento das camadas helicoidais, aumenta-se a densidade e fração volumétrica de fibras no tubo. No entanto, esses parâmetros são pouco controlados pelo processo de enrolamento filamentar utilizado, tendo em vista que na programação da máquina, não é possível fixar esses parâmetros. Além disso, a retirada do excesso de resina é feita manualmente, variando de operador para operador e o tensionamento das fibras também pode influenciar nesses resultados.

### 4.2) Medições de diâmetro e espessura

Os resultados das medições de diâmetro interno e externo médio, bem como os de espessura média, são apresentados na Tabela 6.



Tabela 6 - Resultados das medições dos tubos.

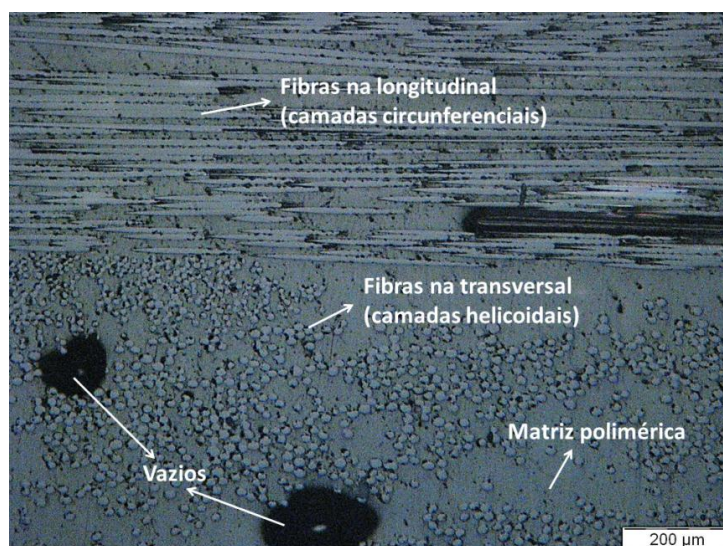
| Tubo | Diâmetro Interno Médio (mm) | Espessura média (mm) |
|------|-----------------------------|----------------------|
| 1    | 101,15 ± 0,89               | 3,61 ± 0,29          |
| 2    | 101,32 ± 0,94               | 3,47 ± 0,18          |
| 3    | 101,43 ± 0,53               | 3,59 ± 0,13          |
| 4    | 102,37 ± 0,42               | 3,52 ± 0,15          |

Analisando os valores encontrados de diâmetro interno, pode-se observar que os mesmos são compatíveis com o valor do diâmetro externo do mandril utilizado (101,6 mm).

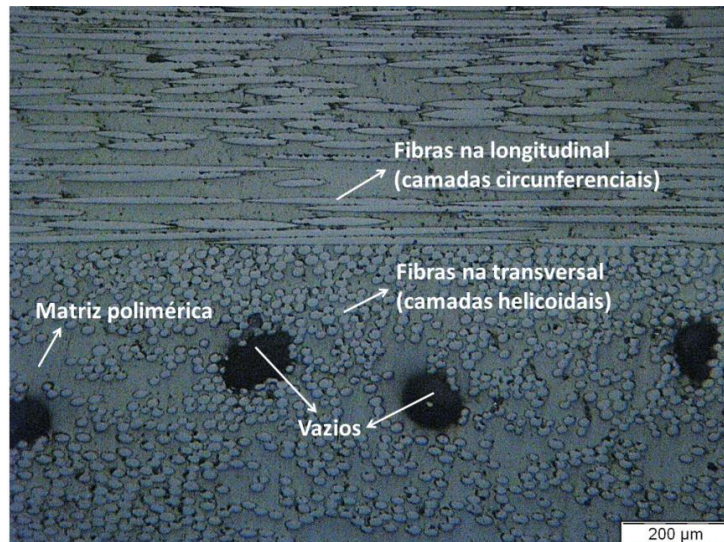
As diferenças dos valores de espessuras são inerentes ao processo de fabricação dos tubos. Durante o processo de enrolamento filamentar, foi observada a sobreposição de fibras e maior acúmulo de resina em algumas regiões. Esse fato pode contribuir para as variações de espessura encontradas nos tubos.

#### 4.3) Análise Microestrutural

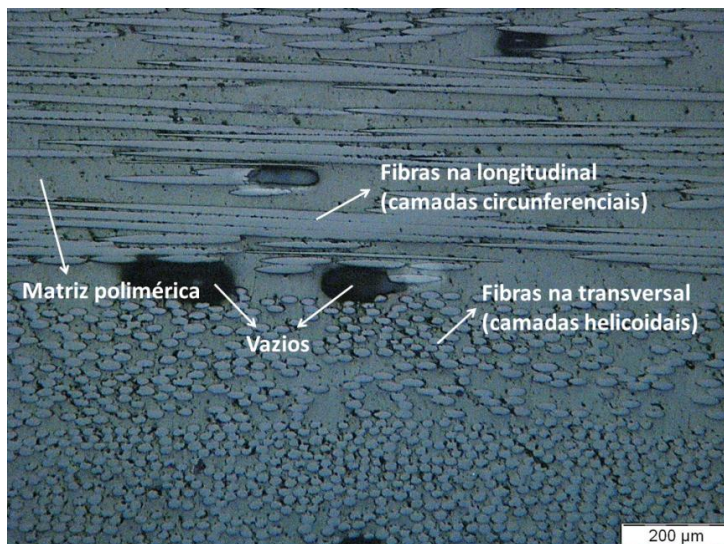
As micrografias a seguir (Figura 32), obtidas por microscopia óptica com aumento de 100x, mostram a secção Transversal ao eixo dos tubos.



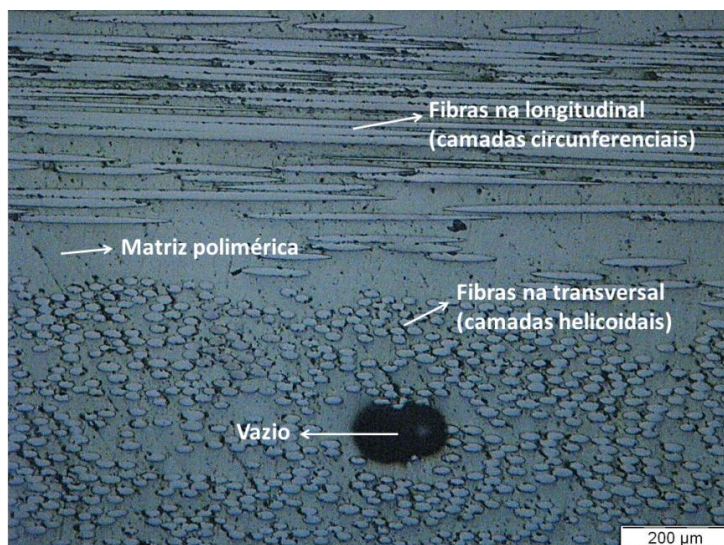
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 32 - Micrografia dos tubos com camadas helicoidais de: a) 30°; b) 45°; c) 55°; d) 60°.



Analisando as imagens, pode-se observar que as fibras se distribuem de forma relativamente heterogênea pela matriz, apresentando regiões com maior e menor concentração de fibras ou apenas fase matriz. Além disso, pode-se perceber a presença de vazios ou “bolhas” na fase matriz e entre as fibras, os quais são oriundos do processo de fabricação. As micrografias mostram-se semelhantes as dos tubos com camadas helicoidais de 55° estudados por SOBRINHO [5] e dos tubos com camadas helicoidais de 30°, 45° e 60° estudados por LEITE [12].

#### 4.4) Ensaio hidrostáticos de pressão interna

A seguir, serão apresentados os resultados dos ensaios hidrostáticos.

##### 4.4.1) Ensaio hidrostáticos sem liner

A Figura 33 mostra o gráfico pressão versus tempo de ensaio dos tubos testados sem o liner de PVC.

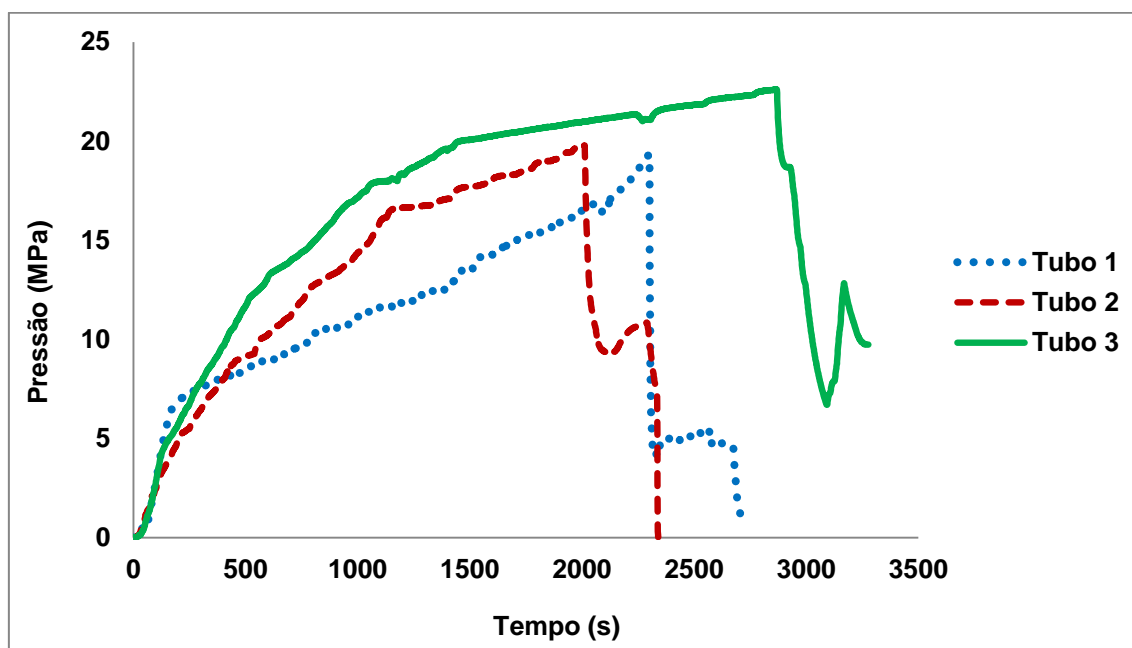


Figura 33 - Curvas Pressão x Tempo dos tubos ensaiados sem liner de PVC.

Os valores encontrados de pressão de vazamento, juntamente com o tempo correspondente são mostrados na tabela 7. Observado as curvas, pode-se perceber que o aumento da pressão não ocorre a uma taxa constante. Esse fato deve-se ao

mecanismo de regulação de injeção de pressão pela bomba, o qual é regulado manualmente.

Devido a problemas no software de aquisição de dados, não foi possível obter os dados do ensaio hidrostático do tubo com camadas helicoidais de 60°, inviabilizando a plotagem da curva. Apenas o valor da pressão de vazamento pôde ser registrado.

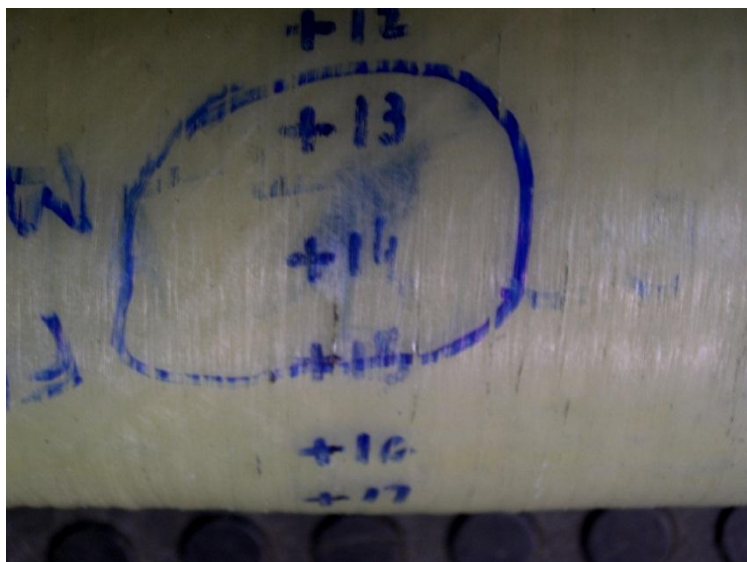
Tabela 7 - Resultados experimentais da pressão de vazamentos dos tubos.

| <b>Tubo</b> | <b>Pressão de Vazamento<br/>MPa (psi)</b> | <b>Tempo de Ensaio<br/>(s)</b> |
|-------------|---|--------------------------------|
| 1           | 19,35 (2807)                              | 2300                           |
| 2           | 19,78 (2869)                              | 2008                           |
| 3           | 22,60 (3278)                              | 2826                           |
| 4           | 23,84 (3457)                              | -                              |

Analisando os valores das pressões de vazamento, pode-se notar que os tubos 1 e 2 apresentaram pouca diferença entre si (0,43 MPa), mesmo com o acréscimo de 15° na orientação das fibras das camadas helicoidais do tubo 2, indicando assim que para essa condição de ensaio, a configuração das camadas helicoidais desses tubos não é tão efetiva para o aumento da pressão de vazamento. No entanto, para os tubos 3 e 4, os quais apresentavam uma diferença de 5° na orientação das fibras das camadas helicoidais, pôde-se perceber um aumento significativo (1,24 MPa). A Figura 34 mostra a superfície de falha dos tubos 4 e 2.



(a)



(b)

Figura 34 - (a) Falha funcional no tubo 4; (b) Marca da falha funcional no tubo 2.

A Figura 34a mostra o vazamento característico da falha funcional no momento em que a pressão máxima foi atingida, semelhante ao apresentado por MARTINS *et al* [20]. Na Figura 34b, é possível perceber uma pequena marca de cor azul característica em todos os tubos após o ensaio, a qual é originada da passagem da água com o corante pelo material durante o vazamento. Além disso, é possível notar a presença de linhas esbranquiçadas paralelas às fibras das camadas helicoidais, indicando os danos sofridos pela matriz.

#### 4.4.2) Ensaios hidrostáticos com liner

A Figura 35 mostra o gráfico pressão versus tempo de ensaio para os tubos ensaiados com liner de PVC, chegando até a explosão.

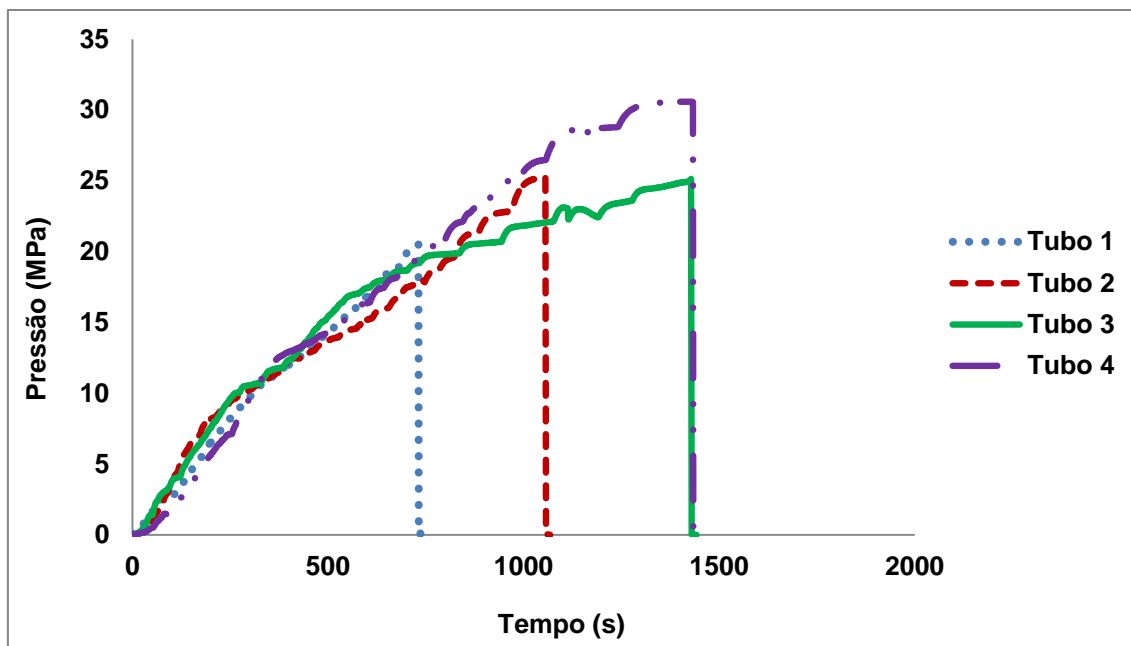


Figura 35 - Curvas Pressão x Tempo dos tubos ensaiados com liner de PVC.

Assim como nos resultados sem liner, as curvas não aumentaram a uma taxa constante de aumento de pressão, pelos mesmos motivos mencionados. A Tabela 8 mostra os valores das pressões de explosão, bem como o tempo de ensaio para cada tubo.

Tabela 8 - Resultados experimentais de pressão de explosão dos tubos.

| Tubo | Pressão de Explosão<br>MPa (psi) | Tempo de Ensaio<br>(s) |
|------|----------------------------------|------------------------|
| 1    | 20,52 (2976)                     | 731                    |
| 2    | 25,24 (3660)                     | 1056                   |
| 3    | 25,13 (3645)                     | 1421                   |
| 4    | 30,58 (4435)                     | 1428                   |

Analisando os valores, pode-se perceber que para essa condição de ensaio, com o aumento do ângulo das camadas helicoidais, houve um incremento considerável na pressão de explosão dos tubos 2 e 4. Já os tubos 1 e 3, com camadas helicoidais orientadas a 30° e 55° respectivamente, apresentaram pressão de explosão pouco acima das pressões da falha funcional. Este fato indica que esses tubos podem ter sofrido danos mais severos nos ensaios sem liner, possivelmente com rompimento de fibras, fazendo com que o material não alcançasse a resistência desejada. Além disso, uma redução localizada de espessura, dano no tubo causado

pela instalação do liner de PVC e rompimento de fibras durante o enrolamento podem também ter contribuído para a redução da pressão de falha estrutural desse tubo.

Durante o ensaio foi observada a emissão de pequenos ruídos, que ficavam mais intensos com o aumento da pressão. Tais ruídos podem provavelmente estar associados a propagação de trincas e ruptura das fibras do tubo.

A Figura 36 mostra a superfície de falha dos tubos ensaiados, sendo esta característica da falha estrutural.

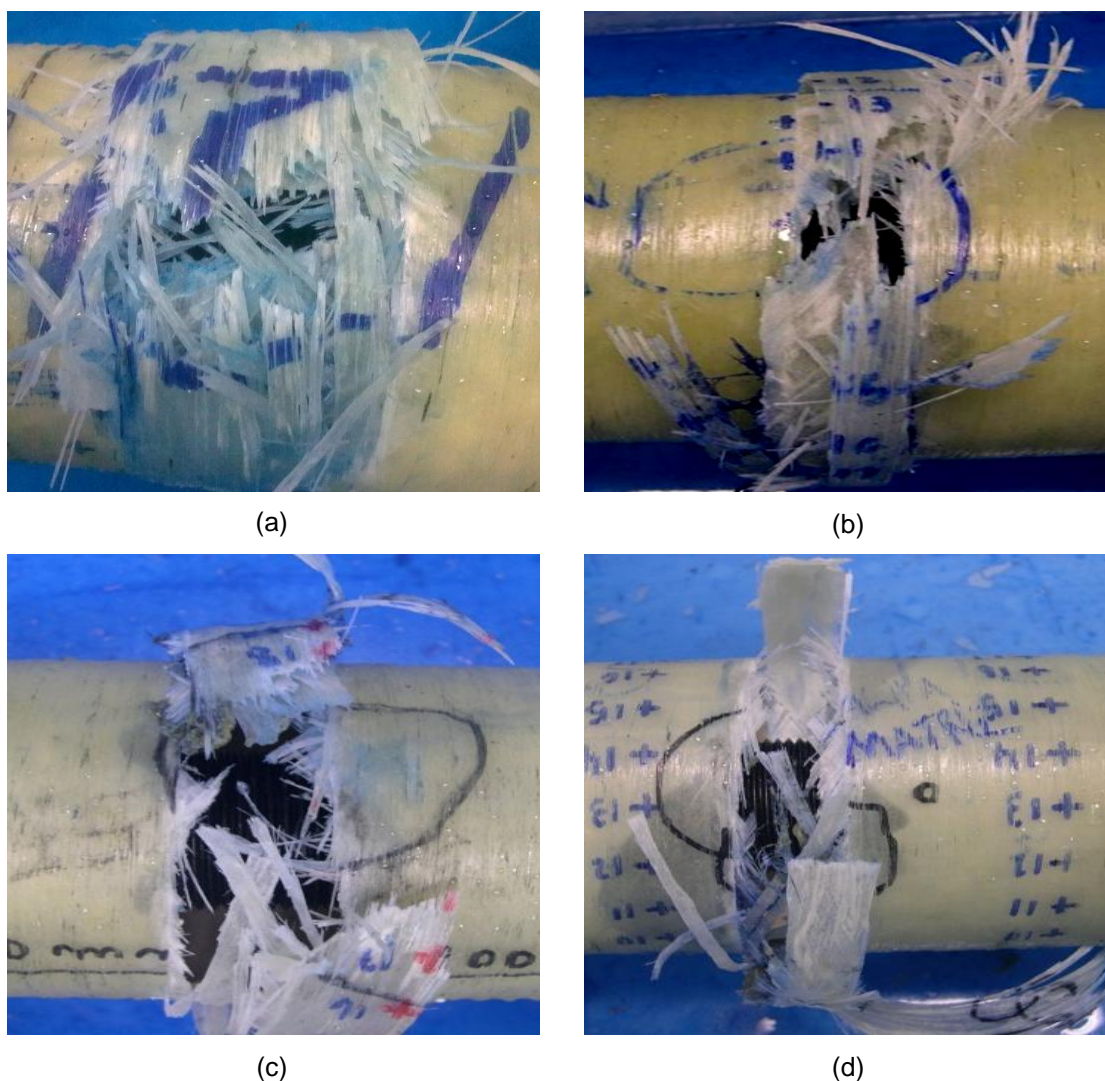


Figura 36 - Falha estrutural no: (a) Tubo1, (b) Tubo2, (c) Tubo 3 e (d) Tubo4.

Analisando a Figura 36, pode-se constatar o rompimento das fibras, apontando que o liner de PVC foi eficiente na estanqueidade do tubo, transferindo todo o carregamento para o compósito. A fratura ocorreu na direção das camadas

circunferenciais, ou seja, perpendicularmente ao eixo do tubo, com presença de delaminação entre as camadas de fibras. Na mesma figura, pode-se perceber também que ruptura ocorreu na mesma região onde foi registrada a falha funcional em todos os tubos, indicando que esta região pode ter se tornado um concentrador de tensão após os ensaios sem liner.

A característica da falha encontra-se semelhante à apresentada por MARTINS *et al* [20], que também utilizou liner de PVC em seus tubos no ensaio hidrostático de pressão interna, verificando a pressão de explosão dos mesmos. MEIJER e ELLYIN [18], também obtiveram superfícies de falha semelhantes em tubos compósitos apenas com camadas helicoidais de 60°, para o carregamento puramente circunferencial [1H:0A].

### **Cálculo da tensão circunferencial**

A partir dos dados das pressões internas de explosão dos tubos, foi possível calcular a tensão circunferencial de falha (S) atuante nos tubos durante os testes hidrostáticos, sendo este tipo de tensão também presente no ensaio de tração em anel. Os cálculos foram feitos a partir da equação 3, presente na norma ASTM D 1599 [24].

$$S = \frac{P (d+t)}{2t} \quad \text{eq. 3}$$

Onde:

S = tensão circunferencial,

P = pressão interna,

d = diâmetro interno,

t = espessura da parede do tubo.

A Tabela 9 mostra os valores encontrados de tensão circunferencial calculados a partir dos resultados de pressão de explosão nos testes hidrostáticos.

Tabela 9 - Valores de tensão circunferencial dos tubos.

| Tubo | Tensão Circunferencial de Falha (MPa) |
|------|---------------------------------------|
| 1    | 297,74                                |
| 2    | 381,11                                |
| 3    | 367,57                                |
| 4    | 459,96                                |

#### 4.5) Ensaios de tração em anel

As figuras 37,38, 39 e 40 mostram os gráficos tensão versus deslocamento do ensaio de tração em anel, referente as amostras dos tubos.

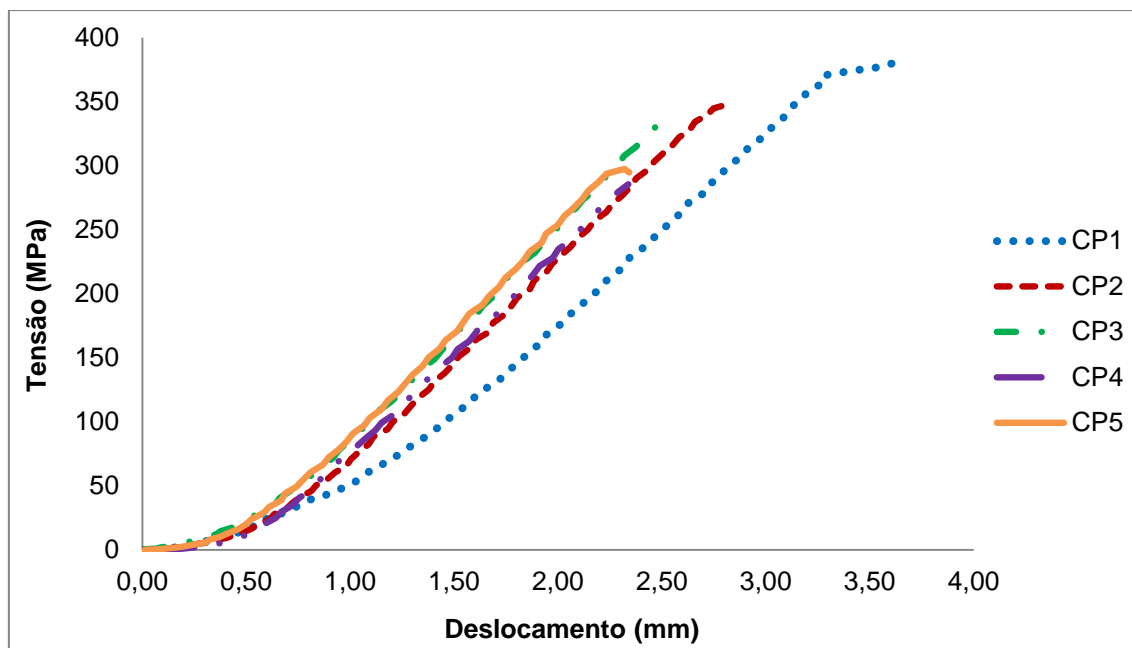


Figura 37 - Curvas Tensão x Deslocamento dos corpos de prova do tubo 1.

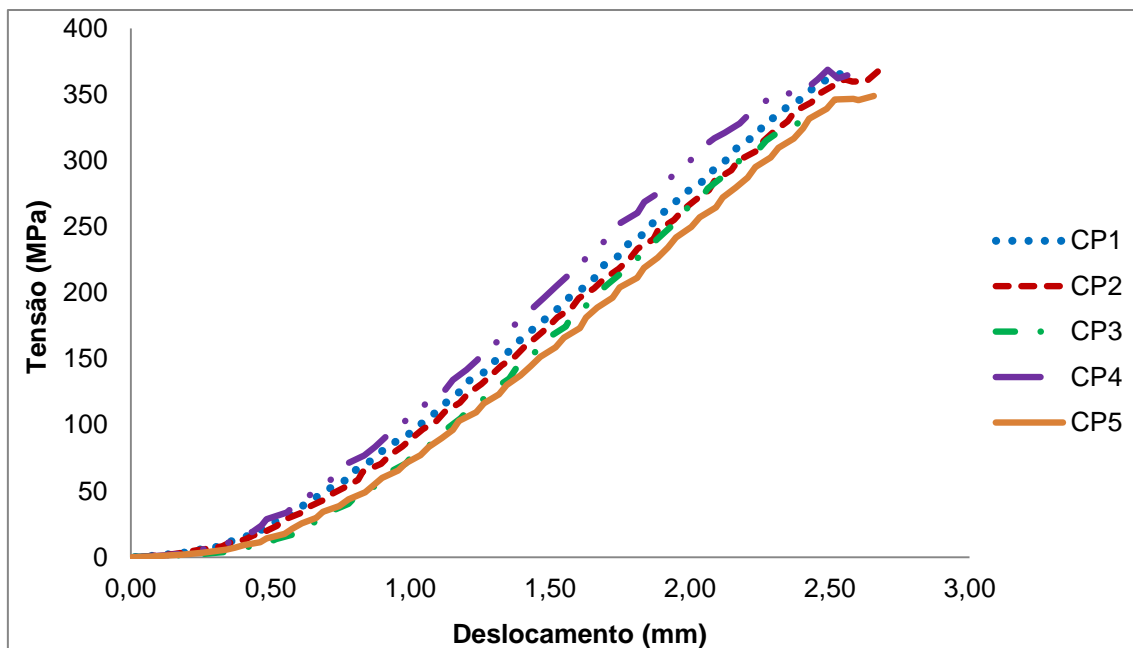


Figura 38 - Curvas Tensão x Deslocamento dos corpos de prova do tubo 2.

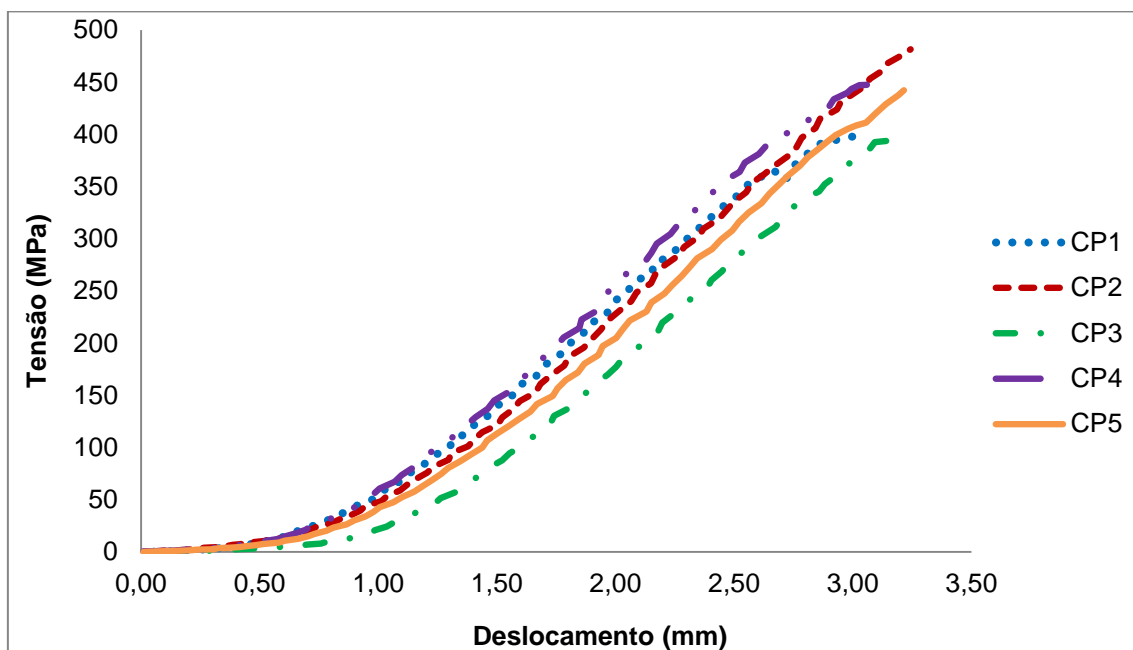


Figura 39 - Curvas Tensão x Deslocamento dos corpos de prova do tubo 3.



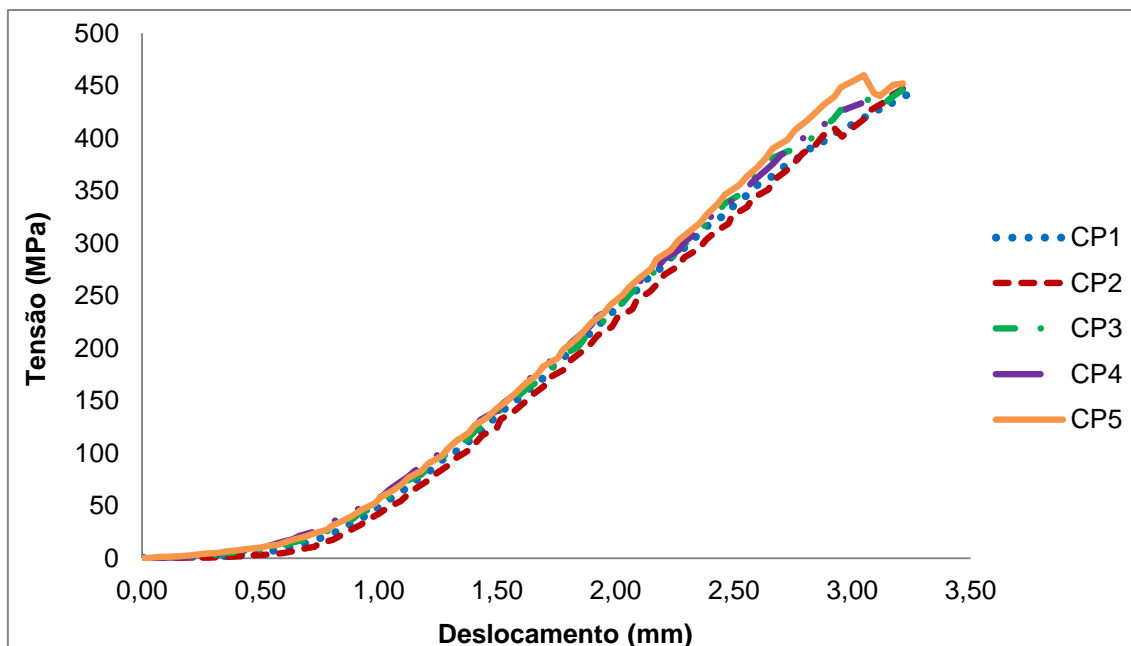


Figura 40 - Curvas Tensão x Deslocamento dos corpos de prova do tubo 4.

Analisando as curvas, nota-se um maior dispersão entre as curvas para o tubo 1 e 3. Isso pode ser explicado pelo fato de alguns corpos de prova foram tirados da borda dos tubos, podendo assim conter uma maior quantidade de fibras. Além disso, os corpos de prova foram usinados utilizando um torno e uma freza, apresentando assim algumas irregularidades em sua geometria. A Tabela 10 mostra os valores médios de tensão de ruptura e deslocamentos das amostras ensaiadas.

Tabela 10 - Resultados experimentais de tensão e deslocamentos médios.

| Tubo | Tensão Média de Ruptura (MPa) | Deslocamento Médio (mm) |
|------|-------------------------------|-------------------------|
| 1    | 329,84 ± 39,46                | 2,73 ± 0,54             |
| 2    | 358,00 ± 15,06                | 2,59 ± 0,09             |
| 3    | 432,76 ± 36,82                | 3,15 ± 0,10             |
| 4    | 445,53 ± 8,46                 | 3,19 ± 0,08             |

Observando os valores, percebe-se que com o aumento do ângulo de enrolamento das camadas helicoidais, ocorre o aumento da tensão média de ruptura. KAYNAK *et al* [22], usando amostras de tubos apenas com camadas circunferenciais, observaram em seu trabalho que aumentando-se o ângulo de enrolamento das camadas helicoidais, ocorre também o aumento da tensão de ruptura dos anéis.

Comparando-se os valores de tensões das Tabelas 9 e 10, nota-se que os valores para os tubos 2 e 4 encontram-se próximos, apresentando uma diferença de 6,5 e 3,2% respectivamente. Essa diferença para os tubos 1 e 3, aumenta em 9,7 e 15,1% respectivamente, pois os mesmos não alcançaram a pressão de explosão esperada pelos motivos mencionados anteriormente. LEITE [12] utilizando um tubo com a mesma configuração do tubo 1, porém com um comprimento menor e sem utilizar barra roscada no ensaio hidrostático, obteve uma diferença de 17% na mesma comparação. A figura 41 mostra a superfície de fratura dos corpos de prova.

Portanto, os ensaios de tração em anel mostraram-se eficazes em uma possível estimativa para os valores de tensão de falha em ensaios hidrostáticos de falha estrutural para o carregamento puramente circunferencial. Sendo mais práticos e rápidos de serem realizados.



Figura 41 - Corpos de prova de anel após o ensaio.

Analisando as superfícies de fratura dos anéis, pode-se perceber a ocorrência de delaminação entre as camadas helicoidais e circunferenciais, que ocorreu provavelmente pela diferença de orientação das fibras dessas camadas. As superfícies de fratura apresentam-se semelhantes as encontradas nos trabalhos de FARO [15] e KAYNAK *et al* [22].

## 5) Conclusões

Em vista dos resultados expostos, pôde-se chegar às seguintes conclusões:

- Os resultados de densidade média dos tubos apresentarem-se coerentes com a densidade dos constituintes do compósito. Além disso, há indícios de aumento dos valores de densidade média e fração volumétrica de fibras com o aumento do ângulo de enrolamento das fibras das camadas helicoidais;
- Os valores de diâmetro interno médio foram coerentes com o valor teórico projetado;
- A variação de espessura dos tubos ocorreu de forma aleatória, que é inerente ao processo de fabricação dos mesmos;
- A análise microestrutural do compósito mostrou heterogeneidades características do processo de fabricação e cura dos tubos compósitos;
- Nos ensaios hidrostáticos de pressão interna sem liner, foi observado que os tubos 1 e 2 apresentaram pouca diferença entre os valores de pressão de vazamento. Já para os tubos 3 e 4, mesmo com uma diferença menor na orientação das camadas helicoidais, houve uma maior diferença entre os valores de pressão de falha;
- Nos ensaios hidrostáticos de pressão interna com liner, percebeu-se que com o aumento do ângulo das camadas helicoidais, houve um aumento significativo na pressão de explosão dos tubos 2 e 4. Os valores para os tubos 1 e 3 apresentaram pouca diferença em relação aos valores de pressão sem liner dos mesmos, possivelmente a danos na fibra nos ensaios sem liner;
- Os resultados dos ensaios de tração em anel mostraram que com o aumento do ângulo das camadas helicoidais, eleva-se a tensão de ruptura dos anéis;

- A comparação entre as tensões circunferenciais de falha nos ensaios hidrostáticos de explosão com as tensões de ruptura dos anéis apresentou-se satisfatória. O tubo 3 apresentou a maior diferença entre esses valores, devido a possíveis danos no teste sem liner, fazendo com que não alcançasse a devida pressão de explosão, mesmo fato ocorrido com o tubo 1. Sendo assim, o ensaio de anel provou-se eficaz em uma eventual estimativa da tensão de falha em tubos submetidos ao carregamento predominantemente circunferencial, visto este tipo de ensaio é mais simples e barato de ser realizado.

## **6) Sugestões para trabalhos futuros**

Realizar ensaios hidrostáticos em tubos compósitos de diferentes configurações, envelhecidos por radiação ultravioleta, para se verificar a influência da radiação na resistência à pressão interna dos mesmos;

Realizar ensaios hidrostáticos em tubos compósitos utilizando extensômetro para se medir a deformação durante o ensaio, podendo utilizar também o ensaio de emissão acústica para se identificar a pressão que impõe os primeiros danos no material;

Estudar o comportamento de tubos compósitos com diferentes configurações submetidos a ensaios de dobramento e pressão externa, após envelhecimento higrotérmico dos mesmos. Comparando-se os resultados com os de tubos preservados.

## 7) Referências Bibliográficas

- [1] KARPUZ, PINAR., 2005, Mechanical Characterization Of Filament Wound Composite Tubes By Internal Pressure Testing. Dissertação de M.Sc., Department of Metallurgical and Materials Engineering.
- [2] SOUSA, S. R. M., PINA FILHO, A. C., DUTRA, M. S., 2007, “Estudo de Falhas em Risers Fabricados em Material Compósito”. 4º PDPETRO. Campinas.
- [3] ALVES, I. G., 2006, Análise do Comportamento Mecânico de Anéis Compósitos Íntegros e com Defeitos Submetidos a Ensaio de Tração. Dissertação de M.Sc., UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- [4] ASM Metals HandBook Vol. 21, 2001 – Composites ASM International
- [5] SOBRINHO, L. L., 2009, Desenvolvimento de Tubos Compósitos para Possíveis Aplicações como Risers. Teses de D.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- [6] GIBSON, R. F., 1994, “Principles of Composites Material Mechanics”, Ed. 1, New York, Mc Graw Hill.
- [7] CHAWLA, K. K., 1987, Composite Materials. 1 ed. Springer-Verlag New York.
- [8] CALLISTER JR, W. D., 2002, Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução, 5 ed., Rio de Janeiro, LTC.
- [9] HULL, D. An Introduction to Composite Materials. Cambridge, 1981.
- [10] CANEVAROLO JR, S. V., 2002, Ciência dos Polímeros um Texto Básico para Tecnólogos e Engenheiros. 1 ed. São Paulo, Artliber ABpol.
- [11] MALLICK, P. K., 2007, Fiber-Reinforced Composites, Materials, Manufacturing, and Design. 3 ed. Michigan, LLC.

- [12] LEITE, C. L., 2011, Desenvolvimento e Caracterização de Tubos Compósitos para Aplicação em Risers Rígidos. , Dissertação de M.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- [13] NETO, F. L., PARDINI L. C., 2006, Compósitos Estruturais Ciência e Tecnologia. 1 ed. São Paulo, Edgard Blücher.
- [14] CAMUSSI, A. B. S., 2007, Desenvolvimento de Material Compósito Visando a Fabricação de Risers Rígidos por Enrolamento Filamentar. Dissertação de M.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- [15] FARO, A. A. S., 2008, Desenvolvimento de Tubos Compósitos Produzidos por Enrolamento Filamentar para Possíveis Aplicações como Risers Rígidos. Dissertação de M.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- [16] ALBUQUERQUE, R. J., 2005, Desenvolvimento de Material Compósito para Reforço de Dutos de Aço. Dissertação de M.Sc., UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- [17] SILVA, R. A. F., 2008, Estudo Numérico e Experimental Visando o Desenvolvimento de Dutos Compósitos Submarinos pela Técnica de Enrolamento Filamentar. Dissertação de M.Sc., UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- [18] Meijer G, Ellyin F. A failure envelope for  $\pm 60^\circ$  filament wound glass fibre reinforced epoxy tubulars. *Composites: Part A* 2008;39:555–64.
- [19] J. Bai, P. Seeleuthner, P. Bompard, Mechanical behaviour of  $\pm 55^\circ$  filament-wound glass fiber/epoxy resin tubes: I. microstructural analyses, mechanical behaviour and damage mechanism of composite tubes under pure tensile loading, pure internal pressure, and combined loading, *Composite Science and Technology* 57 (1997) 141–153.
- [20] Martins, L. A. L., Bastian, L. F., Neto, T. A., 2011, Structural and functional failure pressure of filament wound composite tubes, *Materials and Design* 36 (2012), pp. 779-787.

- [21] Mertiny, P., Ellyin, F., Hothan, A., 2004, An Experimental Investigation on the Effect of Multi-angle Filament Winding on the Strength of Tubular Composites Structures, *Composites Science and Technology*, vol.64, pp.1-9.
- [22] KAYNAK, C., ERDILLER, E. S., PARNAS, L., SENEL, F., 2005, "Use of Split-Disk Tests for the Process Parameters of Filament Wound Epoxy Composite Tubes". In: *Polymer Testing*, vol. 24, pp. 648-655.
- [23] ASTM D2290, Standard Test Method for Apparent Hoop Tensile Strength of Plastic or Reinforced Plastic Pipe by Split Disk Method1.
- [24] ASTM D 1599, Standard Test Method for Resistance to Short-Time Hydraulic Pressure of Plastic Pipe, Tubing, and Fittings.